

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRONOMOS**

*NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO*

**OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO EN
AUTOCLAVE PARA CONSERVAS ESTERILIZADAS.
INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN Y DEL
SISTEMA DE PENETRACIÓN DE CALOR.**

presentado por

AINARA URTASUN PASCUAL

GRADO EN INNOVACIÓN EN PROCESOS Y PRODUCTOS ALIMENTARIOS
ELIKAGAI PROZESU ETA PRODUKTUEN BERRIKUNTZA

Junio, 2016 / 2016ko ekaina

Resumen

El tratamiento térmico sigue siendo la forma de conservación de alimentos más empleada en el sector alimentario aunque actualmente estén surgiendo nuevas formas de conservación. La reducción en los tiempos y temperaturas de estos tratamientos, influyen sobre la calidad final del producto, además de suponer un ahorro energético. La aplicación de un movimiento de rotación mejora la transmisión de calor reduciendo el tiempo de tratamiento.

En este estudio se han empleado seis productos con diferentes propiedades físico-químicas que influyen en la forma de penetración de calor, se han aplicado 5 velocidades de rotación (0, 2, 4, 6 y 8 rpm) y se ha comparado el valor de F_0 obtenido. Con los datos obtenidos de la experimentación, se han calculado nuevos tiempos de procesado por el Método General y el Método de Ball. Además en uno de los productos, se ha estudiado la influencia del espacio de cabeza empleando tres espacios de cabeza de 15, 25 y 35% (v/v).

Los resultados muestran que la composición del producto afecta a la forma de transmisión de calor y esta transmisión se ve favorecida cuando se aplica una velocidad de rotación. El efecto es significativo en cada producto hasta una velocidad límite, conocida como velocidad óptima. La influencia del espacio de cabeza no es significativa ($p > 0,05$). Por último, el Método de Ball predice unos tiempos de tratamiento mayores que el Método General para la totalidad de los productos, pero con ambos métodos se reduce el tiempo mejorándose así la calidad final de los productos y reduciéndose los costes energéticos.

Palabras clave

Transmisión de calor, conservas vegetales, velocidad de rotación, espacio de cabeza, letalidad, calidad.

Abstract

The thermal process is still the form of food conservation most used in the food industry although there are now new emerging forms of conservation. The reduction in times and temperatures of these treatments influence the final product quality, while making energy savings. The application of a rotational movement improves heat transfer by reducing the treatment time.

In this study it was employed six products with different physic-chemical properties that influence the form of heat penetration; it was applied five rotational speeds (0, 2, 4, 6 and 8 rpm) and the value of F_0 obtained was compared. With the data obtained from experiments new processing times were calculated by the General Method and Ball Method. Also in one of the products, the influence of headspace was studied using three headspaces: 15, 25 and 35% (v/v).

The results show that the composition of the product affects the way of heat transfer and this transfer is favored when a rotation speed is applied. The effect is significant in each product until a speed limit, known as the optimum speed. The influence of headspace is not significant ($p > 0.05$). Finally, the Ball Method predicts longer treatment times than the General Method for all products, but both methods reduce the time thus improving the final product quality and reducing energy costs.

Key words

Heat transfer, canned vegetables, rotation speed, headspace, lethality, quality.

Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	El tratamiento térmico	1
1.2.	Formas de transferencia de calor.....	2
1.3.	Sistemas de esterilización.....	3
1.4.	Sistemas de agitación	4
1.5.	Factores que influyen en la penetración de calor	6
1.5.1.	Factores relacionados con el proceso	6
1.5.2.	Factores relacionados con el producto	8
1.5.3.	Factores relacionados con el envase.....	10
1.6.	Evaluación del tratamiento térmico.....	10
1.6.1.	Elección microorganismo de referencia	12
1.6.2.	Cálculo del Valor de Letalidad (F).....	12
1.7.	Justificación del trabajo	13
2.	Objetivos	14
3.	Metodología.....	15
3.1.	Plan de trabajo.....	15
3.2.	Diseño experimental.....	16
3.2.1.	Influencia de la rotación en la penetración de calor.....	16
3.2.2.	Cálculo tiempos de tratamiento con Método de Ball y Método General	16
3.2.3.	Influencia del espacio de cabeza en la penetración de calor	17
3.3.	Materiales	18
3.3.1.	Materias primas y elaboración	18
3.3.2.	Envase.....	19
3.4.	Equipos y sistemas de medición.....	19
3.4.1.	Autoclave.....	19
3.4.2.	Sondas de temperatura: Data Trace (data logger)	20
3.4.3.	Sonda termopar Ellab	21
3.4.4.	Balanza de precisión.....	21
3.5.	Métodos.....	22
3.5.1.	Tratamiento térmico	22
3.5.2.	Optimización del tratamiento térmico.....	23
3.5.3.	Análisis visual	26
4.	Resultados y discusión	27
4.1.	Influencia de la rotación y el tipo de producto en el valor de F_0	27
4.2.	Efecto de la velocidad de rotación en el valor de F_0 para cada producto.....	28

4.3.	Selección del tratamiento térmico por el Método General y el Método de Ball. Aplicación y cuantificación de F_0	33
4.4.	Influencia del espacio de cabeza	35
4.5.	Efecto del tratamiento térmico sobre el aspecto visual del producto	37
4.5.1.	Efecto del tratamiento térmico inicial sobre la calidad visual	37
4.5.2.	Efecto de los tratamientos seleccionados para cada producto sobre su calidad.....	41
5.	Conclusiones	43
6.	Referencias	45
7.	Anexos.....	49
7.1.	Primer bloque de ensayos.....	49
7.1.1.	Ficha técnica análisis visual en estático	49
7.1.2.	Ficha técnica análisis visual 2 rpm.....	50
7.1.3.	Ficha técnica análisis visual 4 rpm.....	51
7.1.4.	Ficha técnica análisis visual 6 rpm.....	52
7.1.5.	Ficha técnica análisis visual 8 rpm.....	54
7.2.	Segundo bloque de ensayos.....	55
7.2.1.	Análisis visual alubia en estático	55
7.2.2.	Análisis visual guisante con velocidad a 2 rpm	55
7.2.3.	Análisis visual maíz con velocidad a 2 rpm	55
7.2.4.	Análisis visual alcachofa con velocidad a 4 rpm	56
7.2.5.	Análisis visual salsa carbonara con velocidad de 8 rpm	56
7.2.6.	Análisis visual de la sopa a velocidad de 2 rpm.....	56

Índice de tablas

Tabla 1. Formas de penetración de calor (Holdsworth y Simpson 2007)	3
Tabla 2. Cantidad de ingredientes presente en cada producto.	19
Tabla 3. Cantidad de ingredientes presente en los líquidos de gobierno	19
Tabla 4. Fases de las que se compone el tratamiento térmico.	22
Tabla 5. Análisis de la Varianza para F_0 - Suma de Cuadrados Tipo III	27
Tabla 6. Prueba Múltiples Rangos para F_0 por producto. Método: 95,0 porcentaje LSD	27
Tabla 7. Prueba Múltiples Rangos para F_0 por velocidad. Método: 95,0 porcentaje LSD	27
Tabla 8. Valores de F_0 y desviación estándar finales para las diferentes velocidades de rotación.....	28
Tabla 9. Velocidad de rotación final para cada producto.	33
Tabla 10. Tratamiento en estático para la alubia: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 11. Tratamiento a velocidad de 2rpm para el guisante: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 12. Tratamiento a velocidad de 2rpm para el maíz: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 13. Tratamiento a velocidad de 4rpm para la alcachofa: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 14. Tratamiento a velocidad de 2rpm para la sopa: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 15. Tratamiento a velocidad de 8rpm para la salsa carbonara: tiempos y valor de F_0	34
Tabla 16. Análisis de la Varianza para f_0 . Influencia de las 5 velocidades de rotación (0, 2, 4, 6 y 8 rpm) y los tres espacios de cabeza de 15%, 25% y 35%.	37
Tabla 17. Comparación del atributo color en cada producto para las diferentes velocidades de rotación.	37
Tabla 18. Comparación de la dureza del producto antes y después del tratamiento a las diferentes velocidades de rotación mediante percepción táctil.....	39
Tabla 19. Comparación del atributo consistencia entre las diferentes velocidades de tratamiento y el producto sin procesar.	39
Tabla 20. Tiempos de calentamiento y mantenimiento de los productos analizados.	41
Tabla 21. Comparación de atributos entre el producto sin optimizar y el optimizado.	42

Índice de gráficos

Gráfico 1. Evolución de la temperatura en el interior del autoclave.....	22
Gráfico 2. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en el guisante.	29
Gráfico 3. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en el maíz.	29
Gráfico 4. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la sopa.	30
Gráfico 5. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la alubia.	31
Gráfico 6. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la alcachofa.	32
Gráfico 7. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la salsa carbonara.	32
Gráfico 8. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 15% (v/v).	35
Gráfico 9. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 25% (v/v).	36
Gráfico 10. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 35% (v/v).	36

1. Introducción

1.1. El tratamiento térmico

Desde la antigüedad se ha buscado la preservación de los alimentos el mayor tiempo posible. Primero fueron mecanismos como la salmuera o el ahumado, aquellos que permitieron alargar la disponibilidad de un alimento. Posteriormente, en el siglo XIX se inventó en EEUU la primera congeladora y en 1810, el francés Nicolas Appert desarrolló lo que se conoce como appertización, una manera de conservar los alimentos introducidos en un recipiente de cristal y sellados en la parte superior con un corcho. Fue hacia 1860 cuando Luis Pasteur, descubrió lo que posteriormente se ha denominado pasteurización, al calentar vino a temperaturas de 70°C y constatar que las bacterias morían.

Existen diferentes técnicas de conservación, según el objetivo que se persiga. Si lo que se quiere es una disminución o inhibición del crecimiento microbiano se presentan las técnicas de refrigeración, congelación, reducción de la actividad del agua o la acidificación. Por otro lado si lo que se persigue es dificultar el desarrollo microbiano se pueden emplear nuevas técnicas, como la tecnología de barreras. Por último, para la inactivación microbiana se puede hacer uso de la temperatura con tratamientos como la pasteurización o la esterilización o el uso de tecnologías más innovadoras como la radiación, los pulsos eléctricos o las altas presiones.

A pesar de los avances y desarrollos mencionados, el tratamiento térmico sigue siendo uno de los más utilizados para preservar la calidad de los alimentos y asegurar su inocuidad.

Durante el tratamiento, el envase está rodeado por un medio encargado de transmitir el calor. Normalmente se emplea un fluido como agua, vapor, aire o una mezcla de estos. El fluido se encarga de transferir energía en forma de calor durante la fase de calentamiento y mantenimiento, para que posteriormente sea el producto el que transfiera esta energía al medio durante la fase de enfriamiento. Así pues, el producto es calentado y enfriado por un mecanismo de transferencia de calor por corrientes de convección.

Cuando alcanza la temperatura de interés, se mantiene durante un periodo de tiempo para posteriormente pasar a la fase de enfriado. A esta temperatura se tiene que asegurar la destrucción microbiana e inactivación enzimática, obteniéndose así productos que cumplan con los requisitos tanto de seguridad como de calidad.

El tratamiento puede llevarse a cabo sobre el producto sin envasar así como sobre el producto envasado donde no existe contacto entre el alimento y el ambiente que le rodea. Además puede ser aplicado a una gran variedad de productos tanto líquidos como sólidos, o mezclas de ambos y así mismo en una amplia variedad de envases, desde latas de hojalata hasta envases novedosos como los doy pack pasando por el tradicional bote de cristal.

Atendiendo a la temperatura empleada (mayor o menor de 100°C) y al objetivo que se persigue se diferencian los siguientes procesos. Por un lado, se encuentran aquellos que tienen lugar a una temperatura inferior a 100°C. Estos son: la cocción (que también puede realizarse a temperaturas superiores a 100°C), el escaldado y la pasteurización. Tienen como objetivos producir una serie de cambios en color, textura y composición; la inactivación enzimática; la eliminación de los gases ocluidos y en el último caso, también persiguen la destrucción de los microorganismos no esporulados.

Por el contrario, si la temperatura que se emplea es superior a 100°C, el proceso se denomina esterilización y su objetivo es la destrucción de la flora patógena y banal y de las fórmulas esporuladas, garantizando así la estabilidad del producto y su seguridad para el consumidor. (Casp, y Abril, 1999). La esterilidad comercial, asegura que si algún microorganismo sobrevive al proceso, este no va a ser capaz de crecer (ni

tampoco sus esporas) bajo las condiciones normales de almacenamiento de los envases. Se puede conseguir combinando una amplia variedad de factores como diferentes tiempos y temperaturas o la introducción de procesos de rotación entre otros.

No obstante, los tratamientos térmicos también pueden acarrear cambios en las propiedades sensoriales y nutricionales (unas veces deseables y otras no). Tiempos de procesamiento rápidos se asocian con menores daños al producto y al mismo tiempo, si el calentamiento es uniforme los valores de letalidad se consiguen de forma más rápida. Esto además tiene consecuencias positivas en la calidad organoléptica final del producto, al reducirse la pérdida de color, textura y nutrientes (Singh Rattan, y Ramaswamy, 2014). Además, el empleo de técnicas de calentamiento rápidas contribuye a mejorar la eficiencia energética y la reducción en el gasto energético.

Por lo tanto, es muy importante definir de forma adecuada para cada producto los parámetros de tiempo y temperatura que van a emplearse, así como el tipo de tratamiento térmico para evitar los efectos que afectan negativamente a la calidad del producto los cuales pueden deberse al sub-procesado así como al sobre procesado. La optimización persigue conseguir un tratamiento en el cual el calentamiento sea rápido y uniforme, para conseguir la destrucción microbiana requerida y al mismo tiempo conseguir la menor pérdida de atributos, color, textura y nutrientes, posible.

1.2. Formas de transferencia de calor

La transferencia de calor es el proceso mediante el cual tiene lugar el transporte de energía entre dos sistemas que se encuentran a temperaturas diferentes. El calor que se transfiere no se puede medir de manera directa, pero sí que pueden medirse sus efectos y cuantificarse mediante mediciones y análisis.

Existen tres mecanismos de transmisión de energía: conducción, convección y radiación. (Kreith, Manglik y Bohn, 2012).

La primera de ellas, la conducción, es la transmisión de calor a nivel molecular y debido al movimiento de electrones libres. Es característico de los materiales sólidos y depende de las propiedades del sólido, fundamentalmente, de la conductividad térmica.

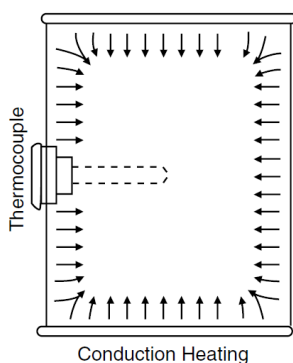


Ilustración 1. Penetración de calor por conducción. (Lopez, A. 1987)

En alimentos líquidos, la transmisión de calor se produce por convección. Así mismo, este fenómeno también se produce entre fluidos y la superficie del líquido. La cantidad de calor transferido es función del propio movimiento del fluido. El valor del coeficiente de película, necesario para determinar la transferencia de calor, depende en gran medida de las características del fluido: la densidad, el calor específico, la velocidad del movimiento del fluido, la geometría del sólido y la rugosidad de la superficie.

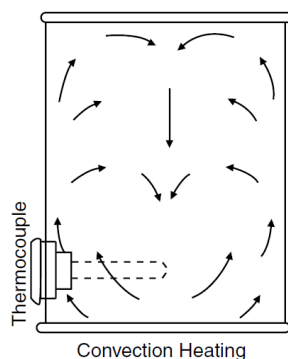


Ilustración 2. Penetración de calor por convección. (Lopez, A. 1987)

Por último, existe la radiación, que comprende una transmisión de calor mediante emisión y absorción de radiación electromagnética. Esta forma de propagación del calor no requiere de ningún medio físico para su propagación.

En la transmisión de calor existen tres fases a considerar: la primera, entre el medio calefactor y el recipiente que contiene el producto; la segunda, a través del material y la tercera desde el recipiente al producto.

En la tabla 1, se encuentran las principales formas de transferencia de calor existente.

Tabla 1. Formas de penetración de calor (Holdsworth y Simpson 2007)

Medio	Tipo de transferencia	Resistencia
Vapor (aire-libre)	Condensación	Ninguna efectividad
Vapor (mezcla de aires)	Convección	Aumenta con el aumento del contenido de aire
Aire	Convección	Alta
Agua, sobrecalentada	Convección	Baja
Agua, caliente	Convección	Decrece con el aumento de la velocidad de agua
Agua, fría	Convección	Media
Llama por infrarrojos	Radiación	Baja
Lecho fluidificado	Convección	Media, depende del grado de agitación
Microondas	Radiación	Ninguna

1.3. Sistemas de esterilización

Como se ha visto anteriormente la esterilización es un proceso empleado en la conservación de los alimentos. Este proceso se lleva a cabo en máquinas conocidas como autoclaves. Se tratan de recintos, con una forma cilíndrica en los cuales se introduce el producto de interés envasado. Existen dos tipos de esterilización que puede realizarse en este tipo de máquinas: la esterilización por cargas y la continua.

Esterilización por cargas

Se pueden tratar productos de diferente tipo pero que tengan el mismo tratamiento térmico. El producto se coloca en jaulas o cestas con diferentes niveles de altura. Una vez está el producto en el interior, se procede

a la realización del tratamiento. En el interior del autoclave se podrá conseguir una presión superior a la atmosférica y una temperatura fijada por el tratamiento que se vaya a emplear.

Esterilización en continuo

El segundo tipo de autoclaves son aquellos que realizan una esterilización continua. Es idóneo para formas de trabajo con grandes volúmenes y en las que se emplea el mismo producto y el mismo envase. A diferencia del autoclave que trabaja por cargas, en el que el agua que se emplea para el tratamiento es calentada, mantenida a una temperatura y enfriada, y el producto no se mueve en el interior del autoclave, en estos autoclaves hay un movimiento de producto por los diferentes puntos del autoclave, que comprenden al igual que en el caso anterior, las fases de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento.

La principal ventaja de estos últimos es el ahorro energético que se produce, al no tener que emplear la misma agua para calentar y enfriar. Es importante también resaltar que este ahorro se produce cuando se trabajan con grandes volúmenes, en cambio, si se realiza a pequeña escala y con interrupciones para cambiar las condiciones de proceso, la mejor energética no es tan elevada. (Casp, y Abril, 1999)

1.4. Sistemas de agitación

A continuación se describen los principales sistemas de agitación presentes en los autoclaves de las industrias alimentarias.

Agitación axial

La rotación axial es propia de los autoclaves que trabajan en continuo. Los envases generalmente están dispuestos de forma horizontal, y se desplazan girando sobre su superficie externa. Existen dos tipos de rotación axial: fija y libre. En la primera los envases están fijos en su compartimento, por lo que solo rotan en la dirección del riel. Por el contrario, en la rotación axial libre, los envases giran en su compartimento además de en la dirección del riel.

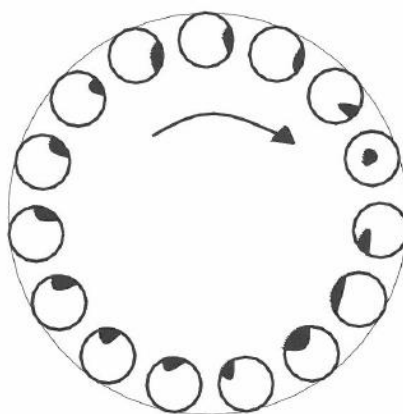


Ilustración 3. Rotación axial fija (Casp, y Abril, 1999)

Rotación tapa-fondo-tapa

En 1950 Clifcorn, Peterson, Boyd and O'Neil, introdujeron la rotación denominada tapa-fondo-tapa, con la que afirmaron que se conseguían unos valores de transferencia de calor desde el medio calefactor al producto más altos, permitiendo así tener unos tiempos de proceso más bajos. En este tipo de rotación, los envases están dispuestos en posición vertical dentro de las cestas. En cada giro, el envase se traslada sobre un eje perpendicular a su máxima longitud, de forma que en cada vuelta pasa dos veces de la posición vertical a la posición horizontal. (Casp, y Abril, 1999)

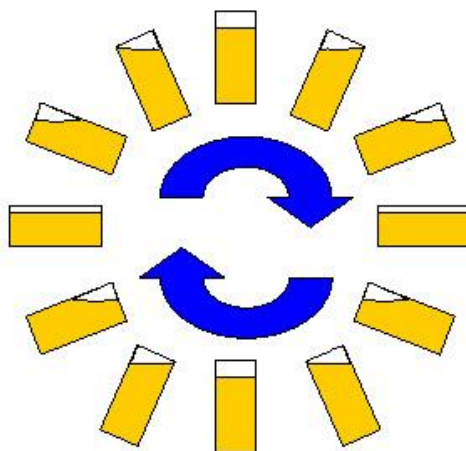


Ilustración 4. Rotación tapa-fondo-tapa (Scott Williams)

A diferencia de la rotación axial, en el que el espacio de cabeza tiene una cierta tendencia a mantenerse pegado a la superficie de los envases, sin llegar al centro geométrico, en la rotación tapa-fondo-tapa, si se regula la velocidad de giro teniendo en cuenta la viscosidad del producto, se puede hacer que la burbuja pase por el centro geométrico. (Casp, y Abril, 1999).

Rotación oscilante

Al igual que en el sistema de agitación tapa-fondo-tapa, los envases rotan en un plano vertical, pero el giro que realiza la jaula no es completo. Al no producirse este giro completo, el producto final sufre menor daño.

Movimiento shaka

En este tipo de autoclaves, se produce un movimiento de la jaula con la que se consigue una agitación lateral. Aunque aún no es tan conocida como las mencionadas anteriormente, se ha visto que es más eficiente que la rotación tapa-fondo-tapa y axial. El inconveniente que presenta es que sólo está desarrollada para autoclaves que trabajan por cargas.

El envase está dispuesto en posición horizontal en la dirección del movimiento. El rápido efecto de la agitación elimina los puntos fríos dentro del envase. (Greg y Walden)

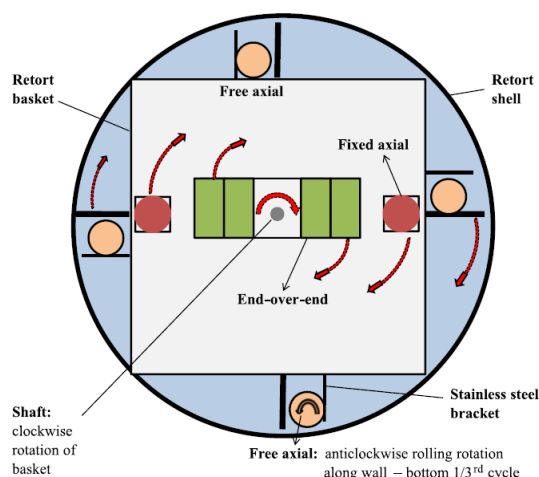


Fig. 1. Schematic of retort rack showing the different modes of rotation.

Ilustración 5. Comparación entre los diferentes tipos de rotación (Scott Williams).

El tipo de rotación que se va a emplear en el experimento es el de tapa-fondo-tapa.

1.5. Factores que influyen en la penetración de calor

La transmisión de calor se ve influenciada por una serie de factores. Unos son previos al tratamiento térmico y otros aparecen durante la realización del mismo. Las primeras publicaciones que se encuentran al respecto corresponden a Bigelow et al. (1920) y a Magoon y Culpepper (1921), los cuales establecieron los principios básicos para determinar los factores que influyen en la penetración de calor.

A continuación se presenta un listado de los diferentes factores que afectan a la penetración de calor según dependan del proceso, del producto o del recipiente. (Holdsworth y Simpson 2007).

1.5.1. Factores relacionados con el proceso

Tratamiento de esterilización: Tª del medio de calentamiento y agitación

A mayor temperatura la penetración de calor es más rápida dado que existe una mayor velocidad de transferencia de calor producida por un mayor salto térmico entre el medio calefactor y el producto que la existente a temperaturas inferiores. Así mismo, si el proceso es en estático la temperatura que se consigue en el interior del producto aumenta de forma más lenta que en el caso de los autoclaves rotativos.

De acuerdo a Knap y Durance (1998) tratamientos con altas temperaturas en poco tiempo y con aplicación de agitaciones pueden mejorar la calidad de productos enlatados. Además también favorece la reducción del consumo de energía durante el procesado. (Casp, y Abril, 1999).

El medio calefactor

La temperatura en la superficie el recipiente viene definida por el coeficiente de película. El vapor tiene un coeficiente de película alto, pero en mezclas de aire-vapor este coeficiente depende de la velocidad y de factores geométricos.

Dependiendo del medio calefactor que se emplee se diferencian las siguientes formas de calentamiento:

Calentamiento con vapor de agua saturado

La presión aplicada al exterior de los envases durante el proceso es la de saturación del vapor de agua a la temperatura de trabajo y una vez que se alcanza el enfriamiento la presión externa baja hasta la atmosférica. Sin embargo, en el interior del producto al mantenerse caliente la presión sigue siendo elevada.

Con estas diferencias de presión, los materiales que se emplean en la conducción de tratamientos térmicos de este tipo tienen que presentar una resistencia mecánica determinada o si no disponer de un sistema de inyección de aire comprimido, con el que se puede fijar por separado la temperatura y presión deseadas. La contrapresión es necesaria para que no se produzca ruptura o deformación del envase, durante el enfriado por el cambio de presiones. En caso de no disponer de este sistema, sólo envases hechos de hojalata con un grosor suficiente son capaces de soportar estas diferencias de presión. Los envases de plástico se deforman primero para posteriormente romperse, mientras que en los botes de cristal saltan los cierres pudiendo llegar a explotar los mismos, debido a que se mantiene la presión elevada en el interior al seguir aún caliente. Si se dispone del sistema de inyección de aire comprimido, cualquier envase puede ser sometido a un tratamiento con este tipo de calentamiento.

Calentamiento con mezcla de vapor de agua-aire

Este tipo de calentamiento presenta la ventaja, frente al descrito anteriormente, de no tener que emplear el proceso de venteo. Para que el calentamiento sea uniforme es necesario asegurarse que la mezcla de vapor y aire es uniforme en todos los puntos del autoclave. Esto se consigue con un ventilador dispuesto al final del mismo (en los horizontales) que se encarga de mezclar el vapor de agua con el aire del interior. A lo largo del proceso, la presión es siempre la que nosotros decidamos gracias al aire comprimido empleado.

Calentamiento con agua sobrecalentada

En este caso el agua se mantiene a una presión superior a la de saturación del vapor a la temperatura de trabajo. La transmisión de calor se produce por intercambio de calor sensible a diferencia de los que utilizan vapor de agua, en el cual se produce un intercambio de calor latente. El agua sobrecalentada se enfría al mismo tiempo que se calientan los recipientes que contienen el producto. Por lo tanto la temperatura del fluido calo-portador no se mantiene constante en cualquier posición del interior del autoclave durante el proceso de intercambio térmico y la uniformidad del tratamiento recibido por los alimentos procesados es función de las diferencias de temperatura que se encuentren en el agua a lo largo del proceso de esterilización.

Agitación del envase

La agitación y rotación mejoran la penetración de calor dependiendo del **espacio de cabeza** y del grado de agitación o **velocidad de rotación**.

Meng y Ramaswamy, (2005) afirman que en comparación con los autoclaves que trabajan en estático, los autoclaves rotativos aumentan significativamente la transferencia de calor del medio calefactor al producto, debido a que favorecen la agitación y la mezcla de partículas. Este movimiento induce a la producción de corrientes de convección, obteniéndose así unos valores más altos en el ratio del calentamiento y un calentamiento más uniforme, consiguiendo una reducción en los tiempos de procesado. La mejora es mayor para productos con baja viscosidad (Berry et al. 1985; Berry y Kohnhorts, 1985). Según Abril, y Casp (2010) la rotación es eficaz en aquellos procesos en los que de forma natural no se producen corrientes de convección. La agitación del bote también previene de la separación de los diferentes ingredientes y las diferentes fases durante el tratamiento.

En 1980, Naveh y Kopelman encontraron que el efecto de la agitación sobre el coeficiente global de transmisión de calor es mejor en rotaciones de tipo tapa-fondo-tapa que en los axiales, cuando se trata de alimentos con una viscosidad alta.

Sin embargo, las velocidades de rotación muy altas no siempre mejoran los valores de penetración de calor y los cambios substanciales aparecen normalmente entre el proceso en estático y el rotativo a velocidades de rotación bajas (Knap, y Durance, 1998; Ali, Sudhir, y Gopal, 2006).

Según afirman Holdsworth, y Simpson, (2007) "existe una velocidad límite, denominada velocidad óptima de rotación, a partir de la cual no existe una reducción en el tiempo del tratamiento. Esto es debido a la fuerza centrífuga que induce condiciones estáticas sobre el alimento contenido en la lata. Así la agitación en el interior de la lata cesará cuando la fuerza gravitatoria se equilibre con la centrífuga".

Además, Tucker (2004) confirma que a velocidades superiores a 15 rpm existe la posibilidad de que aparezcan problemas mecánicos en autoclaves a nivel industrial.

Al mismo tiempo, la mayor o menor agitación del producto tiene relación con el movimiento del volumen no ocupado por un alimento dentro de un envase, denominado espacio de cabeza. En los autoclaves con sistemas de agitación, el movimiento de la burbuja presente en el espacio de cabeza favorece la mezcla de los compuestos y por lo tanto es crítica a la hora de optimizar la transferencia de calor (Tucker et al. 2006).

En cambio, cuando el modo de trabajo es estático, la burbuja de aire actúa como un aislante, dificultando la transmisión de calor hacia el interior del producto.

La presencia de un mínimo espacio de cabeza favorece la transmisión de calor durante el tratamiento. En cambio, si el espacio de cabeza es excesivamente grande puede influir de forma negativa en la transmisión y afectar a los coeficientes h y U disminuyendo su valor (Naveh y Kopelman 1980). En estos últimos, puede haber contenido aire o vacío. El aire tiene poca conductividad térmica (funciona como aislante térmico), y ejerce mucha presión cuando se somete el producto a altas temperaturas, por lo que el proceso en estas condiciones, requiere de una alta sobrepresión para evitar que se produzcan deformaciones en el envase y daños en los cierres. Si el espacio de cabeza contiene vacío, este puede provocar colapso de los envases en los procesos a presión, es decir, en condiciones de procesamiento a temperaturas mayores de 100°C.

Los productos que presentan poco espacio de cabeza, puede deberse a un vacío insuficiente que indica una pérdida de hermeticidad en el envase o a una alteración por desarrollo microbiano. Además, en productos procesados con movimiento, se pierde la capacidad de agitación que realiza la burbuja de aire. (Dignan, y Gavin, 2007).

Existen diferentes factores que pueden influir en el movimiento de la burbuja de aire como son la velocidad de rotación, la geometría del envase, el espacio de cabeza, la viscosidad del producto, la densidad de las partículas o la concentración de las mismas. (Naveh y Kopelman 1980, Anantheswaran y Rao 1985a; Anantheswaran y Rao 1985b; Sablani y Ramaswamy, 1995,1996)

1.5.2. Factores relacionados con el producto

Consistencia

Las propiedades reológicas del alimento como la viscosidad, el tamaño y forma de partícula entre otras, influyen en la penetración de calor debido a las diferentes formas de transmisión de calor.

En 1978, Lenz and Lund determinaron que un aumento en la concentración de las partículas produce una disminución en el valor de U .

La consistencia del producto, el llenado del envase, y la proporción entre sólido y líquido también influyen en el resultado final del valor del coeficiente global de transmisión de calor (U) así como en el coeficiente de película (h). (Rao y Anantheswaran, 1988). Estos efectos han sido ampliamente estudiados a lo largo de la historia. (Deniston et al, 1987; Fernandez et al. 1988; Stoforos y Merson, 1992; Sablani and Ramaswamy, 1995, 1996, 1998, 1999).

Según reportan Sablani y Ramaswamy (1998), la viscosidad afecta sobre todo al valor de U , disminuyendo conforme la viscosidad es mayor. Meng y Ramaswamy (2006), realizaron un estudio en el que observaron el movimiento de las partículas durante la agitación. Conforme la viscosidad del producto era mayor, el movimiento de las partículas se volvía más lento, la mezcla entre ellas era menor, el movimiento era débil, la rotación estaba restringida y el flujo del fluido estaba confinado a la región próxima a la pared del recipiente. Esto provoca una penetración de calor más lenta debido a que la transmisión de calor se produce principalmente por conducción al no existir corrientes de convección

El tamaño de la partícula también influye en el valor de h y U . La mejora de los coeficientes es mayor en productos con sólidos suspendidos de menor tamaño que en aquellos con un tamaño mayor (Abril, y Casp, 2010), y dentro de los de menor tamaño en aquellos que tienen un líquido de gobierno de viscosidad baja (Berry y Dickerson 1981; Berry y Bradshaw, 1982).

Atendiendo a las diferentes propiedades reológicas de los alimentos y a como se produce en ellos la penetración de calor, Olson y Jackson (1940) establecieron una clasificación de los diferentes grupos de productos. Así se distinguen:

- Productos líquidos que se calientan rápidamente debido a la convección interna.
- Productos líquidos que contienen partículas sólidas en suspensión. La porción líquida se calienta rápidamente por convección, y de ahí se transfiere el calor por conducción al interior del producto.
- Productos sólidos que contienen líquidos de gobierno viscosos. Dependiendo de la formulación, empezará a calentarse por convección y una vez se produzca la gelatinización del almidón, por conducción. Estos productos presentan una curva de penetración de calor con dos ratios de calentamiento diferentes, y a la curva se le denomina broken-heating.
- Existen otros a los que les ocurre el caso contrario. Comienzan calentándose por conducción, pero debido a sus propiedades reológicas acaban calentándose por convección. Se produce la misma curva que en el caso anterior.
- Productos que se calientan por conducción como alimentos muy viscosos, o sólidos sin líquido de gobierno.
- Productos que se calientan por conducción pero que tienen líquidos de gobierno con una difusividad térmica menor que el agua como el aceite.
- Productos que están envasados al vacío y que contienen el suficiente volumen de líquido de gobierno para producir vapor y que así se calienten.

Temperatura inicial

Cuanto mayor sea la temperatura inicial, el tiempo de tratamiento será menor. Esta temperatura es especialmente importante en aquellos productos que se calientan por conducción, dado que normalmente al final de proceso no llegan a alcanzar la temperatura de consigna.

Carga microbiana inicial

Una correcta higiene a la hora de desarrollar el producto influye en gran medida en la intensidad del proceso. Productos con una carga microbiana inicial alta necesitan tiempos de tratamiento mayores que aquellos con menor carga microbiana.

Propiedades termo-físicas

La difusividad térmica es el principal factor a controlar. En productos con un alto contenido en agua, este valor es próximo al del agua, pero aquellos con mayor contenido en aceite o con una actividad de agua menor el valor se reduce.

Acidez y pH

El pH tiene un importante efecto en el crecimiento de microorganismos y es específico para cada especie y/o tipo de microorganismo. Es decir, el pH de un alimento es indicativo del tipo de microorganismo que se puede desarrollar en él.

Cada microorganismo tiene un límite máximo y mínimo de valor de pH entre los que se va a poder desarrollar y que fuera de estos no existirá crecimiento, por lo que el pH funcionará como barrera inhibitoria de desarrollo y alteración. Los alimentos siempre van a ser productos o bien ácidos, o ligeramente ácidos (con un pH inferior al neutro pH = 7,0).

Una ventaja a la hora de definir el tratamiento que se va a aplicar es que cuanto más extremófilo es el microorganismo, menos termorresistente es. Esto significa que, por ejemplo, un microorganismo capaz de desarrollarse a pH muy ácidos, va a ser más fácil de destruir mediante calor que otra especie que se pueda desarrollar a pH ácidos, y esta a su vez, se destruirá más fácil que especies que solo se desarrollen en condiciones de baja acidez.

Así las conservas pueden clasificarse en:

- Conservas de **baja acidez**: son aquellas que tienen un pH por encima de 4,6 (límite de crecimiento para *Cl. Botulinum*). Son alimentos con riesgos de desarrollar botulismo por lo que deben ser debidamente esterilizados para alcanzar su seguridad comercial.
- Conservas **acidificadas**: Son conservas de alimentos de baja acidez, pero que en combinación con otros ingredientes ácidos y/o con aditivos acidulantes se baja el valor del pH del producto final homogeneizado hasta valores por debajo de 4,6. En estas condiciones ya no existiría riesgo de desarrollo de botulismo y este tipo de conservas reciben un tratamiento térmico menos intenso (tratamientos de pasteurización).
- Conservas **ácidas**: Son conservas de productos que su pH natural (del producto fresco) ya es inferior a 4,6. Se incluyen aquí los alimentos ácidos que mediante un proceso de fermentación han bajado su pH por debajo del límite de desarrollo de *Cl. Botulismo* también de forma natural (por ejemplo, cerveza, aceituna verde, chucrut...etc.). Este tipo de conservas, al igual que las acidificadas, no necesitarían la aplicación de un tratamiento de esterilización para su conservación. El pH actuará de barrera inhibidora para los microorganismos más termorresistentes.

Los productos que se van a emplear en el estudio están todos englobados dentro de los primeros, de baja acidez.

Aditivos

Algunos aditivos como nitritos o azúcares reducen el tiempo de tratamiento.

1.5.3. Factores relacionados con el envase

Materiales del envase

La conductividad del envase y el espesor determinan el grado de penetración de calor. A menor conductividad del material, y un espesor mayor, peor será la penetración de calor.

Forma del envase

La superficie externa así como el espesor del envase influyen en la penetración de calor. Los envases de menor espesor y mayor superficie de intercambio, son los que consiguen mejores transferencias de calor.

1.6. Evaluación del tratamiento térmico

La evaluación del tratamiento térmico consiste en determinar si la destrucción de un microorganismo objetivo ha sido realizada efectivamente, de tal manera que se asegure su ausencia durante el tiempo de vida

útil del alimento. Por lo tanto hay dos principios básicos en la evaluación del tratamiento térmico: la destrucción térmica de los microorganismos y la forma de transferencia de calor en el alimento.

Para la determinación de la destrucción microbiana, es necesario tener en cuenta una serie de parámetros que caracterizan al tratamiento térmico a emplear. Se definen a continuación:

Valor D

Se define el valor D como el tiempo requerido para reducir en un 90% (un ciclo logarítmico) la población de un microorganismo (Maroulis y Saravacos, 2003) y está determinada por la inversa de la pendiente negativa de un gráfico semilogarítmico de $\log(N)$ o $\log(N/N_0)$ frente al tiempo.

Según Casp y Abril (1999): “nunca se puede garantizar la destrucción total de los microorganismos presentes en un alimento, dado que la curva en coordenadas decimales es asintótica con el eje del tiempo. Es por esto que se necesita un tiempo infinito para que el número de supervivientes sea cero”.

El valor D es característico de cada microorganismo y caracteriza la termo-resistencia de este microorganismo a una temperatura dada. Por lo tanto, si se conoce el valor de D para el microorganismo de interés (a una temperatura previamente definida) y el número de reducciones decimales deseadas, mediante una serie de ecuaciones se puede llegar a determinar el tiempo de tratamiento que se debe aplicar a esa temperatura.

Existe una relación lineal entre el tiempo de tratamiento (t) y el tiempo de reducción decimal (D):

$$t = n \cdot D$$

Donde n es la tasa de reducción decimal (número de reducciones decimales).

La temperatura que se alcanza durante el tratamiento térmico influye en la destrucción térmica así como en el valor de D. Además aquellos productos que se encuentren en medios ácidos, su tiempo de tratamiento será menor que aquellos que están en medios neutros o básicos. (Miranda-Zamora, y Teixeira 2012).

Valor Z

El siguiente parámetro a tener en cuenta en la caracterización de la resistencia térmica en la población microbiana es el denominado valor Z. Se define como el incremento de temperatura necesario para causar una reducción de un ciclo logarítmico en el tiempo de reducción decimal (Heldman y Hartel, 1997). Es característico de cada microorganismo y expresa el cambio en la tasa de muerte con respecto a un cambio de temperatura letal (Morales-Blancas y Torres 2003b).

Puede obtenerse a partir de los valores de D obtenidos o a partir del valor de destrucción térmica (valor de F).

Valor F

Por último se define el valor de destrucción térmica o valor F. Se trata de una medida del tratamiento térmico y se define como el tiempo necesario para inactivar todas las esporas bacterianas en un medio específico a una temperatura específica (Morales-Blancas y Torres. 2003b).

1.6.1. Elección microorganismo de referencia

Bigelow (1920) y Ball (1923), llevaron a cabo los primeros estudios relacionados con la destrucción de microorganismos por calor al desarrollar la teoría de la evaluación del proceso térmico respecto a la muerte o inactivación de los microorganismos. Posteriormente fueron Gillespy (1946), Jackobsen (1954) y Stumbo (1973) los que determinaron que la destrucción térmica de los microorganismos se puede explicar de acuerdo con un proceso estadístico (Casp, y Abril, 1999).

La industria alimentaria dedicada a la elaboración de conservas poco ácidas, toma como microorganismo de referencia a la hora de determinar las características del tratamiento térmico, el *Clostridium Botulinum*, uno de los patógenos más termoresistentes.

Dentro del género *Clostridium* se encuentra la especie *Clostridium perfringens* causante también de enfermedades de transmisión alimentaria. La intoxicación causada por este último es normalmente más leve que la producida por *Botulinum* dado que las neurotoxinas de *Botulinum* están entre las de naturaleza más tóxica y causan enfermedades más severas como el Botulismo, una enfermedad neurológica.

Por este motivo, es el *Cl. Botulinum* el microorganismo que se toma de referencia debiéndose conseguir una F_0 de 3,6 para asegurar su destrucción.

Se trata de un microorganismo anaerobio formador de esporas que puede crecer en medios de baja salinidad y baja acidez. Se considera que a un calentamiento por encima de 121°C y a un tiempo determinado es inhibido, aunque también puede conseguirse la F_0 necesaria a temperaturas inferiores. Las esporas que produce este microorganismo, se pueden inactivar a una temperatura de 121°C, bajo presión y durante 20 minutos.

La temperatura de esterilización para la destrucción de este microorganismo se conoce como 12D, lo que significa que el producto tiene que estar tratado 12 veces el valor D del microorganismo que se utiliza de referencia. Para el *Cl. Botulinum* equivale a un tiempo de 2,5 minutos a 121°C. El valor de z de este microorganismo es de 10 °C. (Sobel et al. 2004).

1.6.2. Cálculo del Valor de Letalidad (F)

A lo largo de la historia, se han desarrollado numerosos métodos para describir el procedimiento de transferencia de calor desde el medio calefactor (en este caso el autoclave) hasta el interior del producto, y calcular el tratamiento de esterilización a aplicar. Algunos ejemplos son: Método General (Bigelow y Esty, 1920); Método fórmula (Ball y Olson, 1957, modificado por Stumbo, 1973); Método de Teixeira (Teixeira et al., 1969a,b); Método de Herndon (Herndon et al., 1968); Método de Flambert y Deltour (Flambert y Deltour, 1972); Método de Hayakawa (Hayakawa, 1970) y el Método de Lenz (Lenz, 1977).

Estos métodos pueden ser clasificados atendiendo a los diferentes cálculos que emplean en Métodos Generales y Métodos Fórmula. (Miranda-Zamora, y Teixeira 2012).

Métodos Generales

Son los procedimientos matemáticos más exactos para la determinación del valor de esterilización. Utilizan datos de temperatura experimentales, sin el empleo de ninguna suposición sobre las relaciones tiempo-temperatura del alimento durante el tratamiento térmico.

El primero de estos métodos fue introducido por Bigelow et al. en 1920 y relaciona los datos de tiempo y temperatura en el punto más frío del envase para obtener el valor de letalidad. Para cada valor de tiempo-temperatura observado durante las curvas de calentamiento y enfriamiento, existe un valor de letalidad. Se

representa el par de valores tiempo-temperatura junto con la letalidad en un gráfico y se integra el área bajo la curva.

El valor final de F es la suma de la letalidad acumulada durante la fase de mantenimiento y enfriamiento. Sirve para cuantificar el efecto del calor sobre un microorganismo dado y relaciona la evolución de la temperatura que se produce para cada intervalo de tiempo.

Métodos Fórmula

Son aquellos que combinan el conocimiento de la cinética de destrucción de microorganismos con los métodos para la predicción de la evolución de la temperatura en el alimento durante el tratamiento.

El primer Método Fórmula fue propuesto por Charles Olin Ball en 1923. Permite describir las curvas de penetración de calor empleando una serie de parámetros empíricos a partir de las curvas de calentamiento y enfriamiento. La diferencia entre la temperatura del medio calefactor y el punto frío del envase decae exponencialmente durante el tiempo de procesamiento después de un periodo denominado lag.

Se encargó de confeccionar tablas de valor de procesamiento (U) con respecto al índice de calentamiento (f_h) y la diferencia de temperatura entre el punto más frío y la temperatura al final del ciclo de calentamiento (g).

A nivel experimental, es el Método General el más empleado, pero este tiene como limitación que no permite la extrapolación de un grupo a otro de los condicionantes del tratamiento térmico.

Han sido numerosos investigadores los que han llevado a cabo estudios en los que se comparaban ambos métodos para la determinación de los tiempos durante el tratamiento térmico (Spinak, y Wiley, 1982; Simpson, et al 2003; Tripathi, y Nirankar Nath 2003).

Las conclusiones a las que llegan no esclarecen del todo cuál de los dos es más efectivo. Mientras que Simpson et al. (2003) concluyen que el método general predice unos tiempos más cortos al tener en cuenta tanto la fase de calentamiento, CUT, (la cuál Ball también considera) y la fase de enfriamiento (no considerada por Ball) en la obtención del valor de letalidad, Tripathi, y Nirankar Nath (2003) determinan unos tiempos mayores con el Método General empleado para el experimento con soja envasada en líquido de gobierno y con tomate. Esto último también fue demostrado años anteriores por Spinak, y Wiley, (1982), los cuales dedujeron tiempos de reducción mayores con el empleo del Método de Ball.

Por este motivo, se ha decidido emplear los dos para la optimización del tratamiento, y poder comparar para los productos seleccionados cuál de los dos es más efectivo.

1.7. Justificación del trabajo

Una vez constatadas ciertas carencias presentes en las pequeñas empresas de la industria alimentaria y tras la revisión bibliográfica y la consulta de diferentes fuentes de información se decidió plantear el presente trabajo. Actualmente las empresas manejan una mayor variedad de productos y formatos para satisfacer las necesidades de los consumidores, pero los tratamientos que realizan no se ajustan a estos nuevos cambios.

Es interesante por ello el estudio de productos que poseen diversas formas de penetración de calor y que están sometidos a diferentes niveles de agitación para ahondar en cómo estos factores afectan a la velocidad de penetración de calor lo que permitirá seleccionar en cada caso los tratamientos más adecuados.

Además, con el empleo de los dos métodos de optimización el rango de posibilidades a la hora de elegir con cual método quedarse es mayor y puede ajustarse más a sus necesidades.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es constatar la influencia de la velocidad de rotación en la transferencia de calor en diferentes productos según sea su forma de penetración de calor: conducción, convección o ambos.

Objetivos específicos:

- Estudiar el efecto de las características del producto en la velocidad de penetración de calor.
- Estudiar el efecto de la velocidad de rotación para cada producto.
- Estudiar el efecto del espacio de cabeza en la transferencia de calor.
- Seleccionar el tratamiento adecuado para cada producto.
- Estudiar los cambios provocados por el tratamiento térmico en los atributos color, textura y consistencia.

3. Metodología

3.1. Plan de trabajo

Para la realización del presente trabajo, cuyos objetivos se mencionan en el apartado anterior, se diseñó el siguiente plan de trabajo.

En primer lugar se realizó una revisión bibliográfica para contemplar lo estudiado hasta el momento relacionado con los productos elegidos y el tratamiento que se quería realizar. Los productos y el tratamiento vienen fijados por el centro en el que se realiza el trabajo, dado que son productos de su interés. Además de la información obtenida por la bibliografía se tuvieron en cuenta los problemas existentes en ciertas industrias a las cuales el CNTA da soporte.

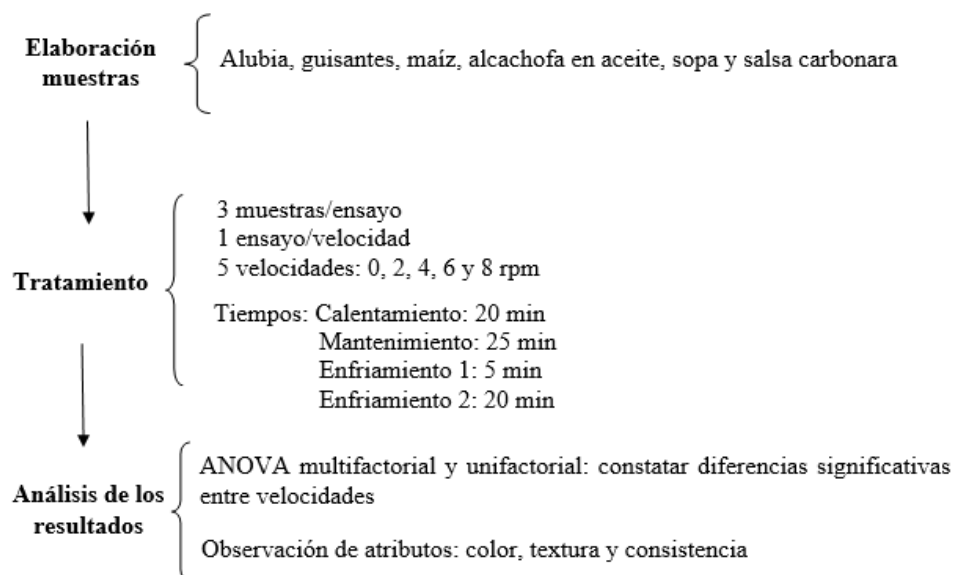
Una vez se definieron los productos y tras la revisión bibliográfica se establecieron los pasos a seguir en la consecución del experimento:

1. Preparación de las muestras.
2. Conducción de las pruebas iniciales en los diferentes modos de trabajo: estático y rotativo.
3. Análisis a nivel sensorial de los cambios que se han producido durante el tratamiento térmico en las diferentes pruebas tomando como referencia el producto sin tratamiento térmico.
4. Análisis de los datos reportados por estas pruebas para la optimización del proceso. Optimización de los tiempos de tratamiento por el Método General y por el Método de Ball (método fórmula).
5. Conducción de las pruebas con los nuevos tiempos de calentamiento y mantenimiento.
6. Análisis sensorial para comparar los productos optimizados de los tratados inicialmente.

Una vez se finalizaron las pruebas, se realizó un análisis estadístico para poder establecer unas conclusiones y contrastar estas hipótesis con los objetivos fijados al comienzo del estudio.

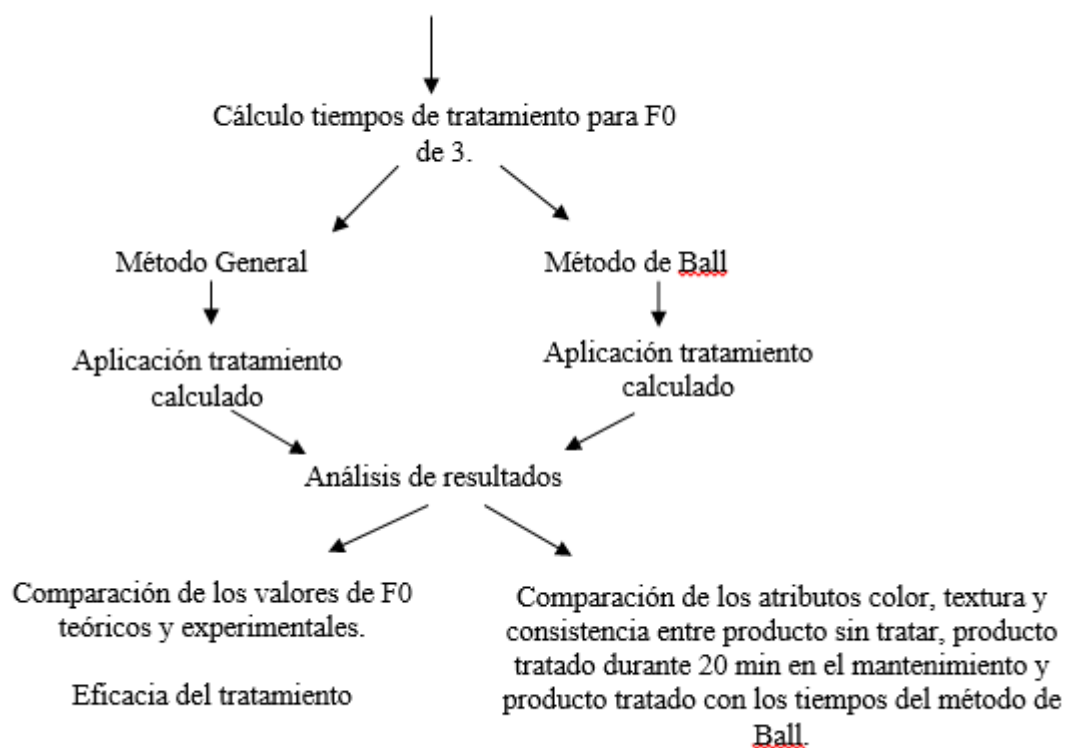
3.2. Diseño experimental

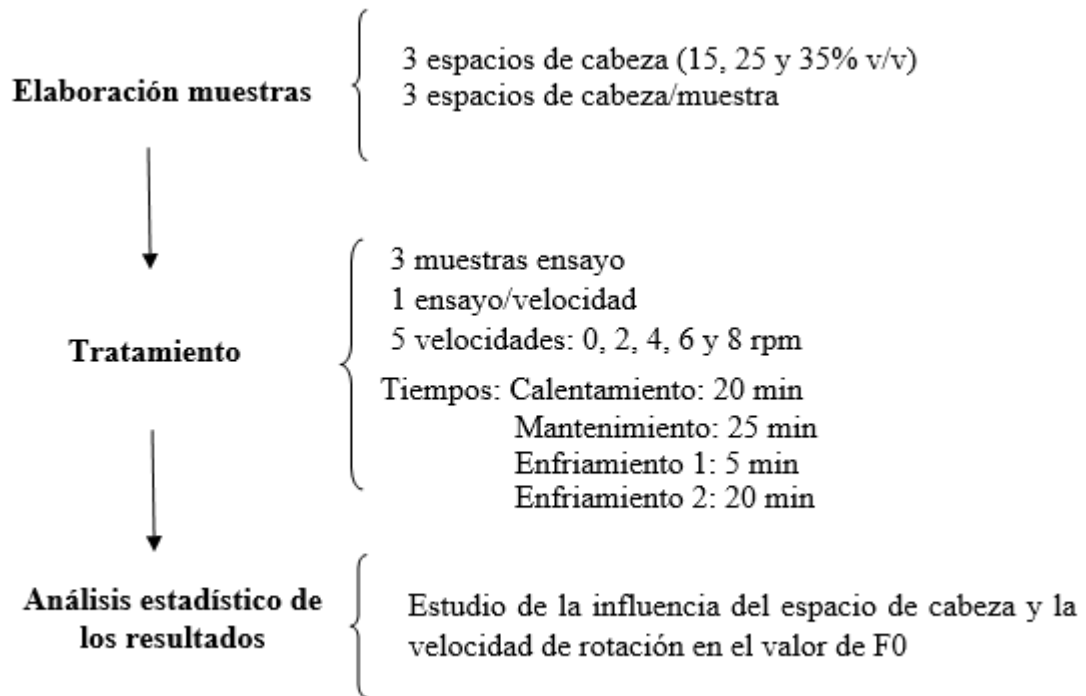
3.2.1. Influencia de la rotación en la penetración de calor



3.2.2. Cálculo tiempos de tratamiento con Método de Ball y Método General

Elección de la velocidad más adecuada para cada producto



3.2.3. Influencia del espacio de cabeza en la penetración de calor

3.3. Materiales

3.3.1. Materias primas y elaboración

Los productos empleados atienden a la clasificación establecida en la introducción. Las materias primas de cada producto se adquieren en el supermercado, sin detallarse las marcas. Los líquidos de gobierno se elaboran para cada producto atendiendo a recetas cedidas por el CNTA. Así, se disponen los siguientes materiales:

- Producto líquido que se calienta por convección: sopa. El producto es elaborado en las cocinas de la planta piloto atendiendo a una receta estándar. La porción líquida se elabora con agua y una pastilla de caldo de pollo. Los fideos de trigo se incorporan al envase asegurándonos de que el peso es el mismo en todos los ensayos y posteriormente se adiciona la porción líquida. Los fideos quedan en el fondo del recipiente.
- Producto líquido con sólidos de pequeño tamaño en suspensión: guisantes congelados. El producto se pone a descongelar con 12 horas de antelación a la preparación de las muestras. Se pesa la misma cantidad para cada recipiente y posteriormente se adiciona el líquido de gobierno en caliente. Con la adición del líquido de gobierno en caliente se favorece la creación de vacío en el envase. Un vacío adecuado reduce la cantidad de oxígeno presente en el envase por lo que asegura una mejor conservación del producto (ya que se evitan las reacciones de oxidación y el crecimiento de microorganismos aerobios). El guisante tiene un diámetro aproximado de 8 ± 1 mm.
- Producto líquido con sólidos de mayor tamaño en suspensión: alubias blancas. Las alubias se mantienen sumergidas en agua blanda durante 15-16 horas con el fin de favorecer la hidratación. Como las legumbres experimentan un ligero aumento de volumen por la absorción de agua, los envases no se llenan completamente, sino hasta unos pocos cm del borde. El tamaño de las alubias es de 12 ± 2 mm de largo y $7,5\pm 1,5$ mm de ancho. Seguidamente se adiciona el líquido de gobierno a $90-95^{\circ}\text{C}$. Cuando se añade el líquido de gobierno caliente el proceso de cerrado y esterilización debe realizarse inmediatamente, para evitar el desarrollo de microorganismos termófilos en el producto.
- Producto muy viscoso cuyo calentamiento se produce por conducción: salsa carbonara. El producto se calienta previamente a su introducción al envase porque se almacena en refrigeración. Sus ingredientes son agua, nata, bacon (5%) (panceta de cerdo, agua, sal, azúcar, estabilizador: e-451i, antioxidante: e-316, conservador: e-250, aroma de humo natural y especias), cebolla, aceite de oliva (3%), almidón modificado de maíz, sal, estabilizantes: e-472e y e-415, aromas y pimienta blanca. Está compuesta principalmente por agua, grasa presente en un 8%, hidratos de carbono 3,1% y proteínas 1,7%.
- Producto cuyo líquido de gobierno tiene una difusividad inferior a la del agua: alcachofas en aceite. Este producto no se prepara en el centro, viene desde fuera preparado para su tratamiento. Las operaciones que se han llevado a cabo en el centro son las de trasvasado del producto al recipiente de interés y calentamiento del aceite hasta temperaturas de $55-65^{\circ}\text{C}$ para favorecer la creación de vacío.

- Producto envasado al vacío cuyo contenido en líquido de gobierno permite su calentamiento por vapor: maíz dulce. Se elimina el líquido de gobierno que posee y se trasvasa el contenido al envase de interés para posteriormente adicionar el líquido de gobierno caliente preparado en el centro. El tamaño del grano es de $0,7 \pm 0,1$ mm.

Tabla 2. Cantidad de ingredientes presente en cada producto.

	Producto (g)	Líquido de Gob. (ml)	Peso total (g)
Alubia	180	205	385
Guisante	250	155	405
Maíz	280	35	335
Alcachofa	302	102	404
1	40	348	388
Sopa 2	40	308	348
3	40	268	308
Salsa carbonara	410	-	410

En la tabla 3, se reflejan las cantidades necesarias para añadir por litro de agua y así preparar los líquidos de gobierno de cada producto.

Tabla 3. Cantidad de ingredientes presente en los líquidos de gobierno

	NaCl (g/l)	Sacarosa(g/l)	Ácido ascórbico (g/l)
Alubias	15	-	0,35
Guisante	15	20	-
Maíz	-	60	2,5

En el caso de la sopa, producto en el cual se va a variar el espacio de cabeza, el volumen final para sopa 1, sopa 2 y sopa 3 es de 15%, 25% y 35% (v/v) respectivamente.

3.3.2. Envase

El recipiente que se emplea para todos los productos es un bote de cristal denominado 16 REF, cuyas características técnicas son:

- Capacidad: 445 ml.
- Peso: 248 g.
- Diámetro: 81,6 mm.
- Altura total: 113 mm.

La elección de estos envases frente a las latas de hojalata se justifica en que al ser transparentes, se puede ver el contenido del alimento, permitiendo así un análisis posterior sin necesidad de abrir el recipiente además de poder re-utilizarse para las distintas pruebas. Las tapas empleadas para cada ocasión, fueron nuevas, para así evitar posibles pérdidas de producto por un mal cierre en el envase.

3.4. Equipos y sistemas de medición

3.4.1. Autoclave

El equipo que se emplea para realizar el tratamiento térmico es una autoclave de dos jaulas, que trabaja en estático y rotativo de la marca Ferlo (modelo RF42J1P, año 2013). Está provisto de un intercambiador de calor y sistema de flujo por spray. Posee un sistema automático de control que permite diseñar los tratamientos térmicos mediante pasos sincronizados de presión y temperatura.

Utiliza agua en circuito cerrado tanto para el calentamiento como para el enfriamiento, sin mezclarlo con aguas exteriores.

A continuación, se presentan las características técnicas:

- Presión máxima de trabajo= 4 bares
- Máxima temperatura de trabajo = 152°C
- 2 válvulas de seguridad taradas a 4 bares de presión máxima
- Panel de control
- Caudal másico de vapor: 76.4 m³/h

El vapor llega al intercambiador de placas a 180°. Dado que el calentamiento se produce por una mezcla de vapor aire-agua, para conseguir la contrapresión que evite la ruptura de los botes, el autoclave dispone de un sistema de inyección de aire comprimido (Casp, y Abril, 1999).



Ilustración 6. Autoclave rotativo marca Ferlo

3.4.2. Sondas de temperatura: Data Trace (data logger)

Son las empleadas para el registro de las temperaturas durante el proceso. Los datos se leen mediante el empleo de un Software de ordenador.

Características técnicas:

- **Rango:** -20+ 140°C
- **Precisión:** ±0,1°C.
- **Dimensiones:** 18x20mm.
- **Peso:** 15gr.



Ilustración 7. Sondas de temperatura inalámbricas Data Trace

3.4.3. Sonda termopar Ellab

Son las empleadas para medir la temperatura de las muestras antes del tratamiento. Están conectadas a un termoregistrador con el cual se conoce la temperatura in situ.

Características técnicas:

- Rango de medida: de 0 a 150 °C.
- Resolución: 0,01 °C.



Ilustración 8. Termoregistrador y sonda termopar Ellab

3.4.4. Balanza de precisión

Necesaria para el control de los pesos de los botes. Es de la marca Sartorius; modelo ED4202S.

- Carga máxima: 4200 g.
- Carga mínima: 0,01 g.
- División de escala: 0,01 g.

3.5. Métodos

3.5.1. Tratamiento térmico

Según lo mencionado en la introducción el tratamiento térmico que se va a llevar a cabo busca conseguir la esterilización del producto. El microorganismo de referencia es el *Cl. Botullinum*, para el cual es necesaria una F_0 de 3,6.

El tiempo y temperatura así como la presión de los diferentes pasos del tratamiento es igual para los 5 ensayos.

El tratamiento se compone de cuatro pasos: el calentamiento con el cual se consigue llegar a la temperatura requerida en la siguiente fase; el mantenimiento, donde el producto permanece a la temperatura de consigna durante el tiempo establecido, produciéndose una transferencia de calor entre el medio calefactor y el producto. La siguiente fase es la de enfriamiento la cual se divide en dos pasos: uno inicial con una duración de cinco minutos y otras con una duración mayor hasta alcanzar los 40°C. La realización del enfriamiento en dos pasos es debida a que como el autoclave baja su temperatura en función del tiempo, cuanto menor sea este más rápida será la obtención de la temperatura de consigna y por lo tanto más eficaz el enfriamiento.

Tabla 4. Fases de las que se compone el tratamiento térmico.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
T^a (°C)	121	121	90	40
P (bar)	2	2	2	0,3
t (min)	20	25	5	20

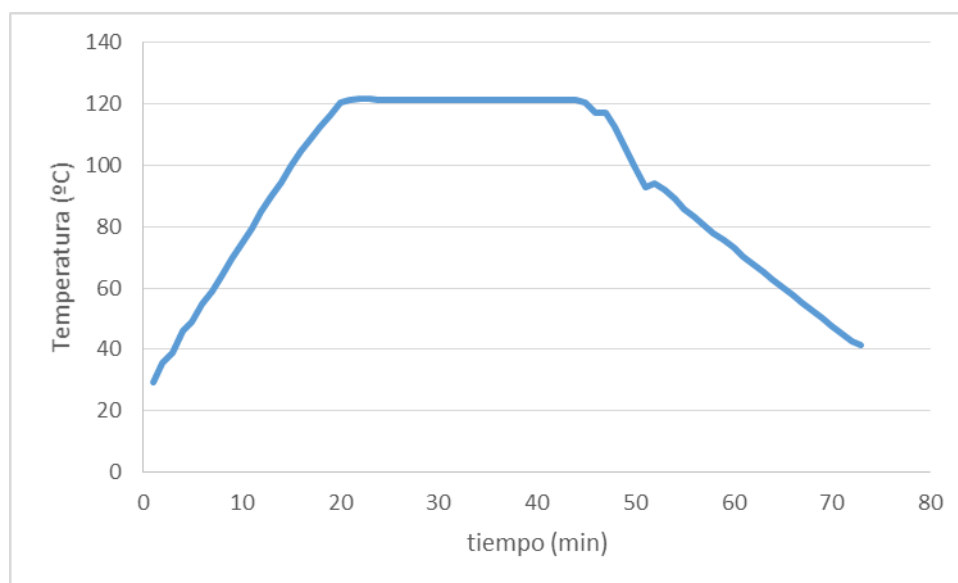


Gráfico 1. Evolución de la temperatura en el interior del autoclave.

Como se observa en el gráfico, el descenso de temperatura durante el primer enfriamiento es mayor que en el segundo para el mismo periodo de tiempo.

Las velocidades de rotación se eligieron a partir de las condiciones de trabajo del autoclave. Así los 5 ensayos corresponden a las velocidades de:

- 0 rpm
- 2 rpm
- 4 rpm
- 6 rpm
- 8 rpm

Dado que se quería ver las diferencias existentes entre el trabajo en estático y en rotación, se minimizó al máximo las posibles variaciones durante el tratamiento. Cuando el autoclave trabaja en modo rotativo es necesario que la jaula esté llena para evitar posibles rupturas de los botes debido al movimiento. Es por esto que aparte de utilizar los mismos tiempos y temperaturas, la disposición de los botes fue siempre en el tercer nivel comenzando por la parte superior de la jaula (de los cuatro existentes) determinada como el punto más desfavorable de la jaula.

El registro de las temperaturas se realiza minuto a minuto con las sondas inalámbricas descritas en el apartado de materiales. Se dispone una sonda inalámbrica en el punto crítico de cada recipiente. Así mismo se dispone otra en el exterior de uno de los recipientes que no contiene producto la cual recoge los datos de temperatura del autoclave. Con esta sonda se puede conocer la temperatura del medio calefactor empleado minuto a minuto y así poder establecer con mayor exactitud las diferentes fases del tratamiento. Además se emplea una sonda con cable para conocer la temperatura de las muestras antes de introducirlas al autoclave y así asegurar que la temperatura de las mismas ha sido constante en los diferentes ensayos.

El punto crítico se define como la zona que más tiempo tarda en alcanzar la temperatura final de esterilización (Varma and Kannan 2006). En este caso se toma como punto crítico el centro geométrico del envase. Así mismo, se asume que si en el punto crítico se ha alcanzado el valor de letalidad requerido, en el resto de puntos que componen el producto también.



Ilustración 9. Disposición final de la sonda

3.5.2. Optimización del tratamiento térmico

Para la optimización de los tiempos de tratamiento se han seguido los dos métodos presentados en la introducción. A continuación, se presentan las fórmulas empleadas para la obtención de los resultados finales de tiempo de calentamiento, tiempo de mantenimiento y tiempo total.

Método General

A partir de la fórmula presentada en el apartado de Evaluación del tratamiento térmico e introduciendo la obtenida a partir de la representación gráfica del Log D y la temperatura se obtienen las siguientes fórmulas que permiten obtener los valores finales de F_0 :

$$t = n \cdot D$$

$$\log D = a - \frac{T}{z}$$

Combinando ambas ecuaciones se obtiene que:

$$\log t = A - \frac{T}{z}$$

Atendiendo a lo dispuesto anteriormente, para cada par de valores de t y T se obtiene un valor de letalidad. Por lo tanto:

$$\log t^* = A - \frac{T^*}{z}$$

A partir de esto, despejando A y sustituyéndola en la ecuación anterior, se obtiene que:

$$t = t^* \cdot 10^{\frac{-(T-T^*)}{z}}$$

Donde t^* y T^* son el tiempo y la temperatura conocidos.

Con esta relación de datos se puede encontrar un tratamiento térmico que equivalga a uno obtenido con anterioridad, siempre y cuando se conozca el valor de z del microorganismo. Además, si se conoce la temperatura de referencia se puede calcular la letalidad.

Primero se despeja el tiempo en función de la temperatura de referencia:

$$t^* = t \cdot 10^{\frac{(T-T^*)}{z}}$$

Si se dispone que el tiempo de tratamiento es un minuto, se obtiene el valor de Letalidad:

$$L_t = 10^{\frac{(T-T^*)}{z}}$$

Con esta fórmula es posible conocer el valor de letalidad o F en cada punto del tratamiento térmico. Para conocer el valor de F final, se suman todos los productos de las letalidades de cada temperatura por el tiempo que se haya aplicado a cada una de ellas:

$$F_{T^*} = \sum L_{Ti} \cdot \Delta t_i$$

Al tratarse de un tratamiento de esterilización, el cálculo final de F_0 queda así:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T-121.1}{z}} dt$$

Método Fórmula

En este caso, para determinar el tiempo o la temperatura inicial del proceso se realizan los siguientes pasos:

Se dispone en una hoja de cálculo Excel, el tiempo de tratamiento, la temperatura del autoclave y la temperatura del producto registrada con una sonda.

A continuación, se calcula la diferencia entre la Temperatura Ambiente (TR) – Temperatura del interior del producto (T), para cada minuto. Seguidamente se calcula el logaritmo de la diferencia de temperatura obtenida en el paso anterior.

En un gráfico del tipo xy dispersión se representa gráficamente el resultado de la cuarta columna y el tiempo (minuto a minuto). Se agrega la línea de tendencia para obtener la ecuación del gráfico y el valor R^2 .

Con los datos disponibles, se calcula el valor f_h (factor de calentamiento) correspondiente al valor de la inversa del valor absoluto de la pendiente de la curva obtenida.

$$f_h = -1 / \text{pendiente}$$

Así mismo se calcula el valor de j_h (factor de retardo) mediante la aplicación de la siguiente fórmula.

$$j_h = \frac{TR - IT_c}{TR - IT}$$

Siendo

TR = Temperatura del autoclave.

IT = Temperatura inicial del producto.

TR - IT_c = 10 elevado a la temperatura de corte del eje logarítmico.

El factor de calentamiento f_h representa la velocidad en la que el calor es capaz de penetrar hacia el interior del producto y depende de las propiedades térmicas del producto y de las dimensiones y geometría del envase. A mayor valor f_h indica calentamientos más lentos.

El factor de retraso j_h representa el tiempo desde que se empieza a calentar el producto hasta que el punto frío del envase comienza a responder al aumento de temperatura. También depende de las propiedades térmicas del producto y la geometría del envase.

A continuación, se calcula el tiempo de esterilizado (minutos), o la diferencia entre el valor de esterilización que se quiere alcanzar entre el valor de letalidad por minuto.

$$U = \frac{F}{10^{\left(\frac{T - T_{rsf}}{z}\right)}}$$

Con el valor del factor de calentamiento y el tiempo de esterilizado f_h/U se procede a determinar el valor del log g. Se obtiene a partir de tablas determinadas por Ball.

El valor de g representa la diferencia de temperatura entre el punto más frío y la temperatura del autoclave al final del tiempo de calentamiento y se calcula a partir del resultado obtenido en las tablas mediante, $g = 10$ elevado al valor de log g. Es importante destacar que el valor presente en las tablas se encuentra en °F.

Por último, empleando la ecuación siguiente se determina el tiempo de proceso.

$$t_b = f_h \cdot \log \left(\frac{j_h \cdot (RT - IT)}{g} \right)$$

El tratamiento térmico en autoclave presenta tres fases: el calentamiento, el mantenimiento y el enfriamiento. En el tiempo calculado anteriormente se encuentran contempladas sólo las fases de calentamiento y enfriamiento dado que Ball asume que la fase de enfriamiento se comporta de forma análoga a la fase de calentamiento, por lo que no se tiene en cuenta el calentamiento que sufre el producto en las primeras fase del enfriado (inercia térmica).

Para que el autoclave estabilice a la temperatura de mantenimiento, el autoclave necesita un tiempo de subida denominado CUT (Come Up Time). Ball supone que el tiempo del CUT se divide en 2 partes:

- Se considera que el 58% del tiempo de subida CUT no afecta a la letalidad.
- Y que el 42% del tiempo de CUT, que si afecta, y estaría contemplado en resultado del tiempo de tratamiento a la temperatura de proceso.

Es decir $t_b = 0,42\% \text{CUT} + \text{Tiempo de mantenimiento}$.

Al final, con el empleo de estas ecuaciones, es posible determinar el tiempo de calentamiento así como el tiempo de mantenimiento.

3.5.3. Análisis visual

Los tratamientos térmicos intensos con tiempos prolongados para el mismo valor de F pueden afectar a los diferentes componentes de los alimentos en mayor medida que el uso de temperaturas elevadas y periodos de tiempo cortos.

Los cambios que se evalúan sobre los productos son de naturaleza física, al ser externos y visibles porque atañen a la apariencia, textura y flavor del producto alimenticio.

Al ser el objetivo del trabajo la optimización del tratamiento térmico desde el punto de vista de penetración de calor y obtención del valor de letalidad y no de mejora de la calidad del producto, el análisis a realizar no cuenta con el empleo de métodos instrumentales de análisis del color o textura.

Los atributos que van a emplearse para caracterizar el producto están vinculados a su apariencia y aspecto externo y son: el color, la textura y la homogeneidad.

En el primer bloque de ensayos se compara el producto antes y después del tratamiento térmico para ver en qué medida afecta la aplicación de calor al producto.

En segundo lugar, una vez se ha optimizado el producto, se va a comparar este con el que ha sufrido el tratamiento inicial, para observar si los cambios de tiempo afectan a la calidad final.

El método empleado en ambos análisis consiste en la utilización de una escala de medida de 10 cm para cada atributo. El color y la homogeneidad presentan valores negativos mientras que la textura sólo contiene valores positivos. El color se mide en los seis productos; la textura en la alubia, el guisante, el maíz y la alcachofa y la homogeneidad en la sopa y la salsa carbonara.

Para el primer análisis, los valores de la escala correspondiente al atributo color van desde -5 (más claro), 0 (no cambios) hasta +5 (más oscuro). En el caso de la textura, como la temperatura produce un ablandamiento de los tejidos, en la escala no se considera la posibilidad de un aumento en dureza, por lo que el 0 indica que no ha habido cambios y conforme se avanza en la escala aumenta el grado de ablandamiento. Por último, la escala de homogeneidad es igual que la de color, siendo el -5 una disminución de la homogeneidad o lo que es lo mismo, mayor heterogeneidad; el 0 una no presencia de cambios y el +5 un aumento de la homogeneidad.

En el segundo bloque de ensayos, los tres atributos se evalúan de la misma manera. Los valores negativos hasta -5 indican cambios de color a más claros, una textura más dura y una pérdida de homogeneidad; el 0 indica que no existen cambios y los valores positivos, cambios de color a más oscuros, una textura más blanda y un aumento de homogeneidad.

4. Resultados y discusión

4.1. Influencia de la rotación y el tipo de producto en el valor de F_0

En primer lugar se ha llevado a cabo un ANOVA multifactorial entre los factores producto y velocidad sobre F_0 . Ambos factores tienen un valor-P inferior a 0,05, por lo que tienen un efecto significativo sobre F_0 . Además existe interacción entre ellos.

Tabla 5. Análisis de la Varianza para F_0 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Producto	5021,83	5	1004,37	497,67	0,0000
B:Velocidad	1572,52	4	393,13	194,80	0,0000
INTERACCIONES					
AB	730,833	20	36,5416	18,11	0,0000
RESIDUOS	121,089	60	2,01815		
TOTAL (CORREGIDO)	7446,27	89			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Debido a la interacción existen entre el producto y la velocidad, se realiza un ANOVA simple para cada factor sobre F_0 .

Los resultados de la prueba de Múltiples Rangos para ambos factores se presentan a continuación:

Tabla 6. Prueba Múltiples Rangos para F_0 por producto. Método: 95,0 porcentaje LSD

Producto	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Salsa carbonara	15	1,1	X
Alcachofa	15	4,16667	X
Maíz	15	16,9933	X
Sopa	15	17,28	X
Guisante	15	17,5067	X
Alubia	15	20,7833	X

Tabla 7. Prueba Múltiples Rangos para F_0 por velocidad. Método: 95,0 porcentaje LSD

Velocidad	Casos	Media	Grupos Homogéneos
0	18	5,42833	X
2	18	12,28	X
4	18	13,9189	X
6	18	15,4911	X
8	18	17,74	X

En la tabla 6 se distinguen dos grupos homogéneos para el valor de F_0 según el tipo de producto que se tiene: calentado por convección o por conducción. Analizando el efecto que tiene la velocidad, se diferencian dos grupos: con velocidad de rotación y sin ella.

De los resultados estadísticos se deduce que en general existen sólo dos formas de calentamiento las cuales corresponden a la conducción y convección. En cambio atendiendo a lo expuesto en la introducción, estas dos formas de calentamiento sufren variaciones según las propiedades térmicas y reológicas del producto resultando en otras formas de penetración de calor. El guisante, la sopa y el maíz ambos se calientan por convección, pero no se generan las mismas corrientes en todos, debido a la diferencia en la proporción de líquido de gobierno así como en el tamaño de las partículas, aspecto que queda reflejado en la obtención de F_0 . El maíz, debido a su bajo contenido en líquido de gobierno, sufre un calentamiento mediante el vapor generado siendo la transmisión de calor mediante calor latente y no sensible. La alubia, que según el resultado estadístico también se calienta por convección, presenta unos valores de F_0 superiores a sus

semejantes, factor que indica una variación en la penetración de calor. En el caso de los calentados por conducción la alcachofa alcanza valores de letalidad mayores que la salsa carbonara debido a que presenta una viscosidad menor. De acuerdo a lo establecido por Meng y Rammaswamy (2005), se puede afirmar que la velocidad de rotación influye en la penetración de calor pero como confirmaban Knap, y Durance, (1998) y Ali, Sudhir, y Gopal, (2006) a la vista de los resultados las diferencias significativas aparecen entre el tratamiento en estático y velocidades de rotación bajas y no existen cambios entre estas y velocidades superiores.

4.2. Efecto de la velocidad de rotación en el valor de F_0 para cada producto

En la tabla 8 se recogen los valores de F_0 con su desviación estándar en cada producto y para las distintas velocidades de rotación así como si existen o no diferencias significativas entre ellos en la obtención del valor de F_0 .

Tabla 8. Valores de F_0 y desviación estándar finales para las diferentes velocidades de rotación.

Velocidad (rpm)	Guisante		Maíz		Sopa		Alubia		Alcachofa		Carbonara	
V0	5,20±0,61	A	5,50±0,17	A	2,53±0,70	A	18,27±0,18	A	0,93±0,35	A	0,13±0,06	A
V2	17,53±4,01	B	17,73±3,15	B	16,53±2,54	B	19,61±1,60	AB	1,83±0,25	A	0,43±0,40	A
V4	21,07±1,18	BC	16,90±1,15	B	20,27±2,15	C	20,28±1,36	AB	4,67±0,25	B	0,33±0,23	A
V6	21,20±1,25	C	20,70±0,70	C	23,23±0,38	D	21,84±0,85	BC	5,40±0,95	B	0,57±0,35	A
V8	22,53±0,78	C	24,13±0,42	D	23,83±0,15	D	23,91±2,41	C	8,00±1,55	C	4,03±1,39	B

* Diferencias entre letras mayúsculas en cada columna indica la existencia de cambios significativos debido a la velocidad de rotación para cada producto.

La diferencia de tratamientos reside únicamente en la velocidad que se les aplique, comprendida entre 0 rpm para el proceso en estático hasta 8 rpm. El nivel de significación es de 0,05. En los tres primeros productos, cuyo calentamiento es por convección, los cambios significativos aparecen cuando se aplica la primera velocidad de rotación. En cambio, en el resto de productos, es necesario aplicar velocidades mayores para percibir cambios significativos.

Además como se recoge en la tabla, la influencia de la rotación es mayor para productos que presentan una viscosidad menor como el guisante, el maíz y la sopa que para los de mayor viscosidad, hecho que también afirmaron Berry y Kohnhorts, (1985); Berry et al. (1985).

Holdsworth, y Simpson, (2007) afirmaron que existía una velocidad óptima de rotación a partir de la cual no existe una reducción en el tiempo de tratamiento. A partir de lo presentado en la tabla, en productos como el guisante y la sopa a partir de las 6 rpm no se presentan cambios significativos en el valor de F_0 .

El análisis de los resultados se realiza en base a la forma de penetración de calor: convección o conducción o una mezcla de ambas.

Calentamiento por convección

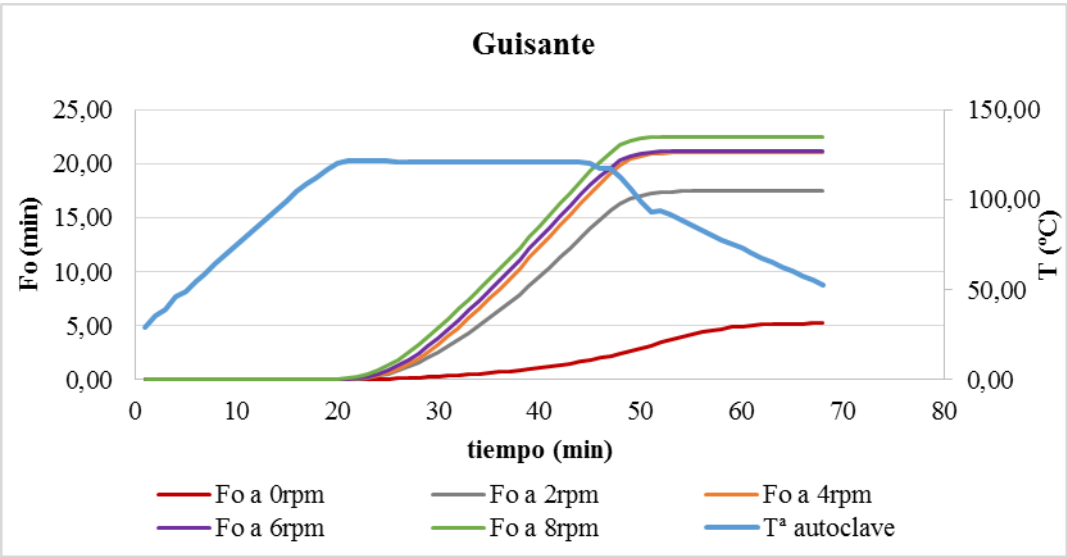


Gráfico 2. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en el guisante.

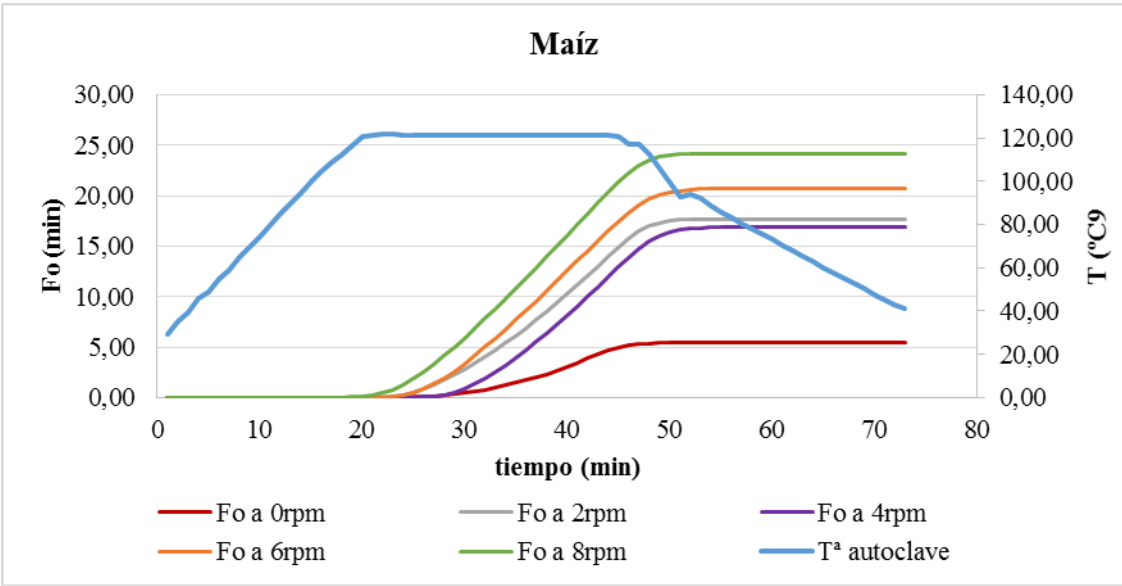


Gráfico 3. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en el maíz.

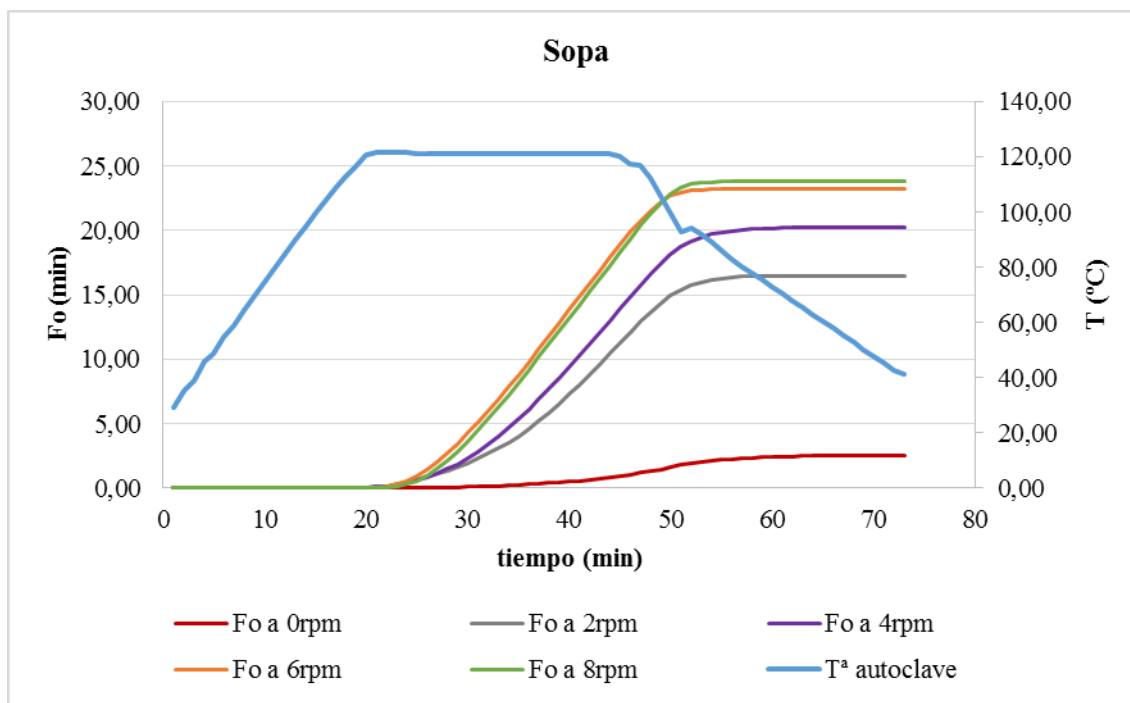


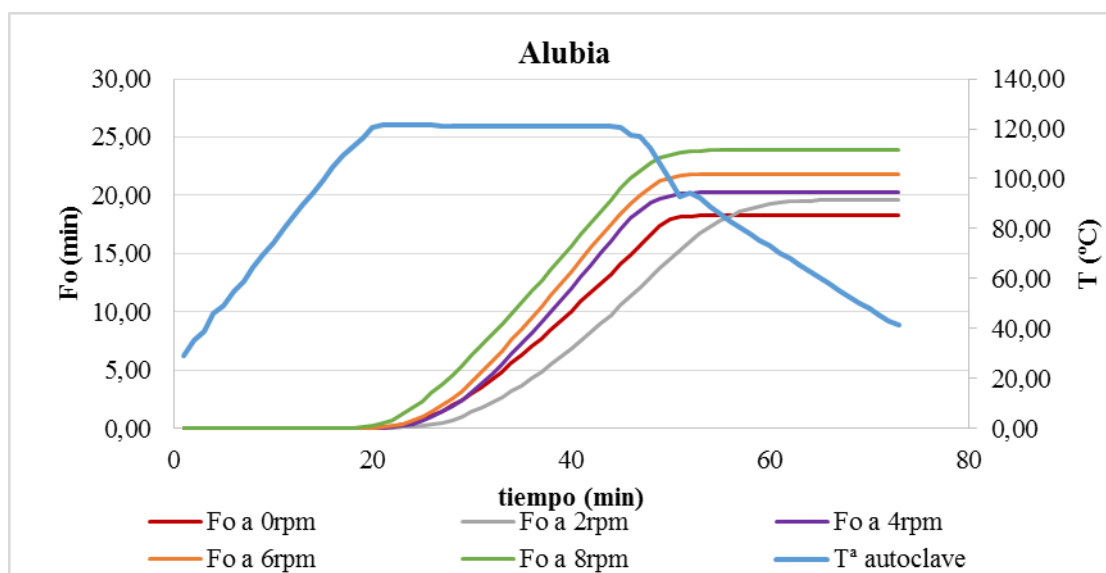
Gráfico 4. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la sopa.

La transmisión de calor en los tres productos se realiza por convección. Existe una diferencia muy significativa entre el tratamiento en estático y la primera velocidad de rotación. La rotación favorece el movimiento del líquido de gobierno así como la de las partículas, mejorando la transmisión de calor.

La sopa presenta el valor más bajo de F_0 en el tratamiento en estático. Esto es debido a que la pasta que contiene la sopa, cuando es tratada en estático se acumula en el fondo del bote quedando una masa compacta. Esta masa dificulta la transmisión de calor, provocando que este deje de ser de tipo convectivo para ser conductivo.

La pasta está compuesta de trigo, cuyo componente mayoritario es el almidón. Este compuesto formado por cadenas de amilosa y amilopectina sufre el fenómeno de gelatinización. Durante el tratamiento, su estructura altamente organizada se calienta y empieza un proceso lento de absorción de agua en las zonas intermicelares amorfas que están menos organizadas y por lo tanto más accesibles. Además algunas moléculas, particularmente la amilosa, se solubilizan y se difunden hacia el agua. Si el calentamiento continúa, se rompen y se observa una solubilización parcial. Esta solubilización provoca la formación de un gel incrementando la viscosidad del medio. Cuando se aplica un movimiento, los fideos también se hidratan aumentando su volumen pero debido al movimiento estos no quedan unidos.

El maíz también tiene un alto contenido en almidón, pero debido a que su proporción en líquido de gobierno es más baja, el aumento de la viscosidad no influye tanto en la transferencia de calor.

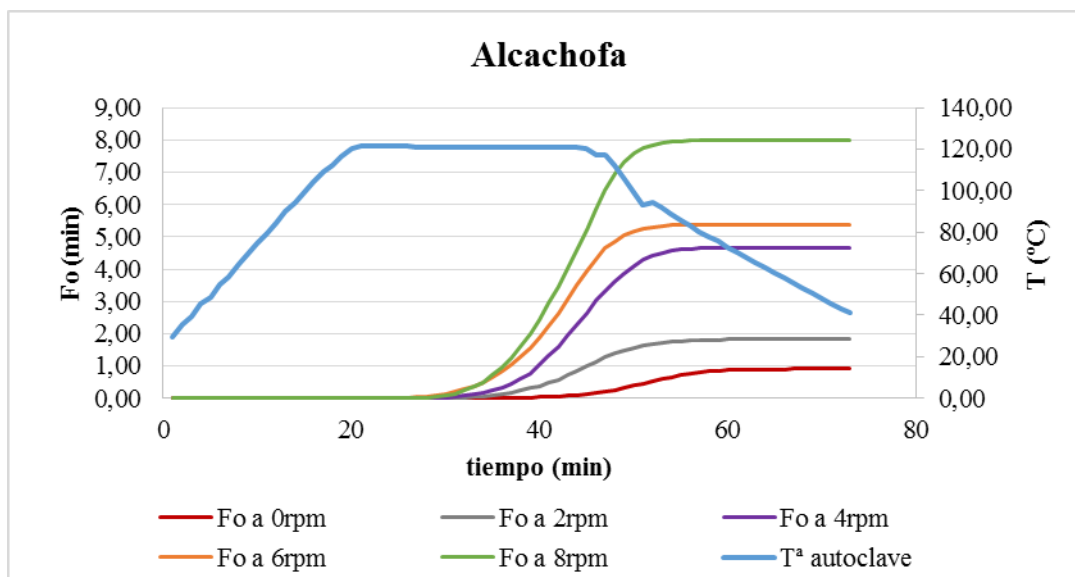
Calentamiento por conducciónGráfico 5. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la alubia.

En este producto, el componente mayoritario también es el almidón, el cual sufre el mismo proceso de gelatinización descrito anteriormente.

El aumento del tamaño del grano y de la viscosidad debida a la gelatinización provoca un tipo de curvas de calentamiento conocidas como broken-heating. Inicialmente la proporción de producto sólido respecto del líquido de gobierno es baja. Esto provoca un calentamiento inicial por convección mediante las corrientes generadas en el líquido de gobierno. Una vez se alcanza el tiempo de gelatinización el producto pasa a calentarse por conducción, produciéndose un cambio en la curva de penetración de calor conocido como broken-heating. .

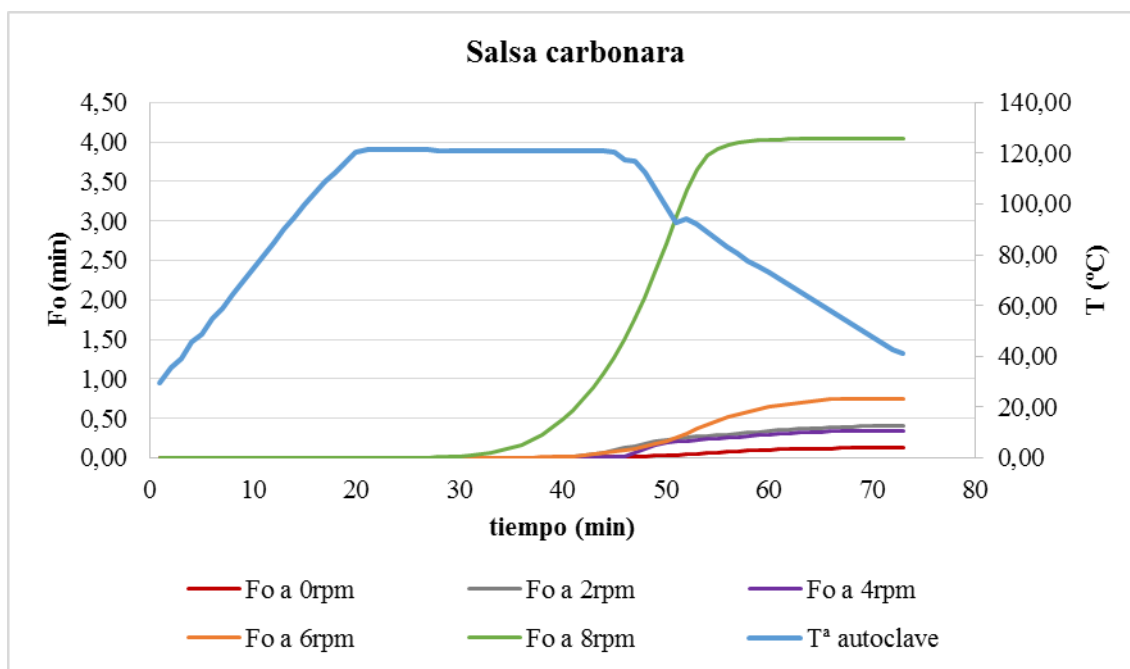
En este tipo de productos la influencia de la rotación no es tan significativa como en los productos anteriores, porque debido a la inexistencia de un líquido que pueda originar corrientes, la transmisión de calor es más lenta. Como se aprecia en la tabla 8 y en el gráfico 5, los valores de F_0 finales presentan diferencias significativas entre el tratamiento en estático y la máxima velocidad de rotación, mientras que en las velocidades intermedias estos cambios no se producen.

En la gráfica se observa como el valor de letalidad requerido 3,6 comienza a adquirirse en los primeros minutos del mantenimiento, y sigue aumentando hasta la fase de enfriamiento donde apenas sufre variación. Al final de la fase de mantenimiento, el tratamiento con una velocidad de agitación de 2 rpm tiene un valor de letalidad menor que el tratamiento en estático, pero debido a la inercia térmica y a que el producto está en agitación, finalmente aumenta el valor de F_0 .

Gráfico 6. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la alcachofa.

El líquido de gobierno que rodea el producto es aceite, el cual posee una difusividad térmica menor que el agua. La difusividad térmica caracteriza la rapidez con la que varía la temperatura de un material ante una solicitud térmica. Como la del aceite es inferior a la del agua, alcanzar temperaturas altas en el punto crítico de este recipiente, requiere más tiempo que con agua. Es por esto que el valor de F_0 es más bajo. En este producto la diferencia más significativa aparece cuando se le aplica una velocidad de rotación de 4 rpm. El movimiento del aceite en el interior del envase favorece la aparición de corrientes al igual que en los productos mencionados con anterioridad.

En el gráfico queda reflejada cierta similitud de resultados de F_0 entre el tratamiento en estático y la velocidad de rotación de 2rpm y entre las velocidades intermedias de 4 y 6 rpm.

Gráfico 7. Evolución de F_0 para cada velocidad de rotación en la salsa carbonara.

Por último, en la salsa carbonara el mecanismo de transferencia de calor es la conducción. Este hecho es debido a la alta viscosidad que presenta por su composición (agua, nata y beicon principalmente).

Sablani y Ramaswamy (1998) afirmaron que la viscosidad afectaba al valor del coeficiente U y por lo tanto a la penetración de calor, siendo esta más lenta conforme más alta fuese la viscosidad. Además en 2006, Meng y Ramaswamy confirmaron lo anterior tras la realización de un estudio en el que observaban el movimiento de las partículas durante la agitación a diferentes viscosidades y constataron que este movimiento era más lento conforme la viscosidad era mayor.

Debida a su alta viscosidad los cambios significativos no aparecen hasta que se aplica la máxima velocidad de rotación (8rpm), al permitir el movimiento de las partículas y facilitar la transferencia de calor entre ellas.

4.3. Selección del tratamiento térmico por el Método General y el Método de Ball. Aplicación y cuantificación de F_0

A partir de los datos que se obtienen de la influencia de la rotación sobre la F_0 desarrollados en el punto anterior, se seleccionó para cada producto la velocidad de rotación que fuese adecuada teniendo en cuenta también el aspecto final del producto.

Tabla 9. Velocidad de rotación final para cada producto.

Producto	Velocidad final
Alubia	0rpm
Guisante	2rpm
Maíz	2rpm
Sopa	2rpm
Alcachofa	4rpm
Carbonara	8rpm

A la vista de los resultados se observa que es necesario aplicar una mayor velocidad de rotación conforme el líquido de gobierno o el producto presenta una mayor viscosidad. Esto es debido a que a mayor viscosidad el movimiento de las partículas es menor y esto influye al mismo tiempo en la transferencia de calor al no formarse corrientes de convección.

De los datos de la muestra más desfavorable de cada velocidad seleccionada se llevó a cabo los cálculos para la obtención de los valores de calentamiento y mantenimiento mediante el Método General y el Método de Ball. El uso de la muestra más desfavorable se justifica porque si se asegura que en ese caso se alcanza el valor de requerido, en el resto también se alcanza.

La ventaja de hacerlo con el Método de Ball, es que éste permite modificar las temperaturas iniciales, de calentamiento y mantenimiento así como los tiempos durante el proceso. Debido a esta característica es un método más conservador que el General. Además no tiene en cuenta la fase de enfriamiento, donde por inercia térmica también se produce un aumento del valor de F_0 . El método General ajusta los tiempos en la fase de mantenimiento, al ser la fase donde se obtienen los valores de F_0 .

El valor de F_0 empleado en los cálculos es de 3 debido a que aunque para el *Cl. Botulinum* es de 3,6, como el Método de Ball no tiene en cuenta la fase de enfriamiento en la cual sí que se consigue aumentar el valor de F_0 debido a la inercia térmica, se deja este margen para ajustar más el tratamiento.

A continuación, se presentan los tiempos necesarios según los dos métodos para cada producto así como el valor de F_0 al final del mantenimiento y del proceso total una vez aplicados los tratamientos (tablas 10-15).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 10. Tratamiento en estático para la alubia: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	11,0	31,0	$3,51 \pm 0,20$	$6,15 \pm 0,51$
Método de Ball	12,9	17,7	30,6	$3,95 \pm 0,46$	$7,62 \pm 0,37$

Tabla 11. Tratamiento a velocidad de 2rpm para el guisante: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	14,0	34,0	$4,15 \pm 0,44$	$6,68 \pm 0,69$
Método de Ball	14,7	20,3	35,0	$4,75 \pm 0,32$	$7,23 \pm 0,25$

Tabla 12. Tratamiento a velocidad de 2rpm para el maíz: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	12,0	32,0	$3,84 \pm 0,32$	$5,94 \pm 0,15$
Método de Ball	14,6	20,1	34,7	$4,23 \pm 1,56$	$6,13 \pm 0,98$

Tabla 13. Tratamiento a velocidad de 4rpm para la alcachofa: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	27,0	47,0	$2,18 \pm 0,51$	$5,09 \pm 0,43$
Método de Ball	19,8	27,3	47,1	$3,01 \pm 0,47$	$5,79 \pm 0,72$

Tabla 14. Tratamiento a velocidad de 2rpm para la sopa: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	15,0	35,0	$1,23 \pm 0,21$	$4,23 \pm 0,45$
Método de Ball	15,7	21,7	37,4	$1,65 \pm 0,78$	$4,86 \pm 0,68$

Tabla 15. Tratamiento a velocidad de 8rpm para la salsa carbonara: tiempos y valor de F_0 .

	Tiempo de calentamiento (min)	Tiempo de mantenimiento (min)	Tiempo total (min)	F_0 obtenido al final del mantenimiento (min)	F_0 total obtenido (min)
Método General	20,0	33,0	53,0	$0,43 \pm 0,21$	$2,76 \pm 0,46$
Método de Ball	22,1	36,5	58,5	$0,46 \pm 0,27$	$3,05 \pm 0,60$

Los tiempos de mantenimiento así como los totales son más cortos en todos los productos con el Método General que con el de Ball, como afirmaron Simpson, et al. (2003) y a diferencia de lo que expusieron Tripathi, y Nirankar Nath (2003) y Spinak, y Wiley, (1982). Así mismo, el valor de F_0 obtenido al final del mantenimiento así como al final del tratamiento es superior para el tratamiento con los tiempos de Ball que para el del método general. El valor de letalidad es principalmente función del mantenimiento, por lo que a mayores tiempos de mantenimiento, valores mayores de letalidad se consiguen.

Las mayores diferencias en cuanto al valor de F_0 se registran en los productos cuyo calentamiento es por convección como se aprecia en las tablas. La alubia, la sopa, las alcachofas y la salsa carbonara tienen unas diferencias menores en el valor de F_0 al final del mantenimiento.

Al final del tiempo de tratamiento se alcanza el valor de letalidad requerido en todos los productos, a excepción de la salsa carbonara la cual con ambos métodos registraba valores de letalidad muy bajos. Esto puede ser debido a que en los resultados antes de la optimización la desviación estándar que presentaba este producto para la velocidad de rotación de 8 rpm, era alta ($4,03 \pm 1,39$) teniendo en cuenta los valores de F_0 que obtuvo. Por este motivo para este producto, sería necesario aumentar el tiempo de mantenimiento, para asegurar su esterilidad al final del tratamiento.

4.4. Influencia del espacio de cabeza

En uno de los productos, la sopa, se llevó a cabo una modificación del espacio de cabeza para ver su influencia en la penetración de calor. Los porcentajes de espacio de cabeza son de 15%, 25% y 35% (v/v).

En las gráficas 8, 9 y 10 se representan los valores de F_0 para cada velocidad de rotación en los tres espacios de cabeza empleados.

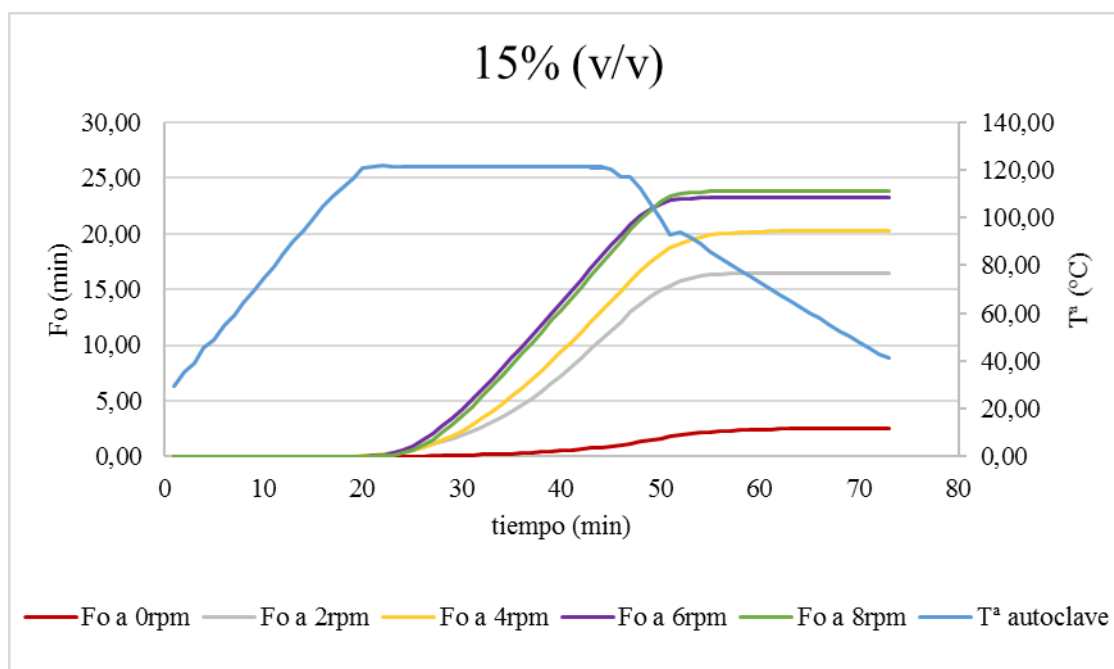


Gráfico 8. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 15% (v/v).

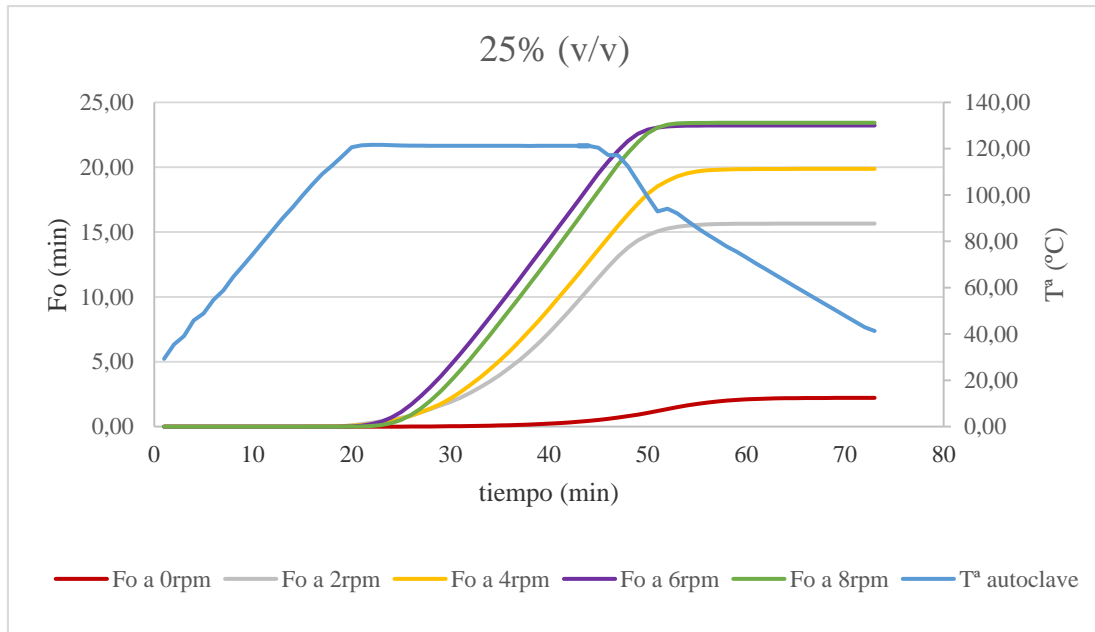


Gráfico 9. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 25% (v/v).

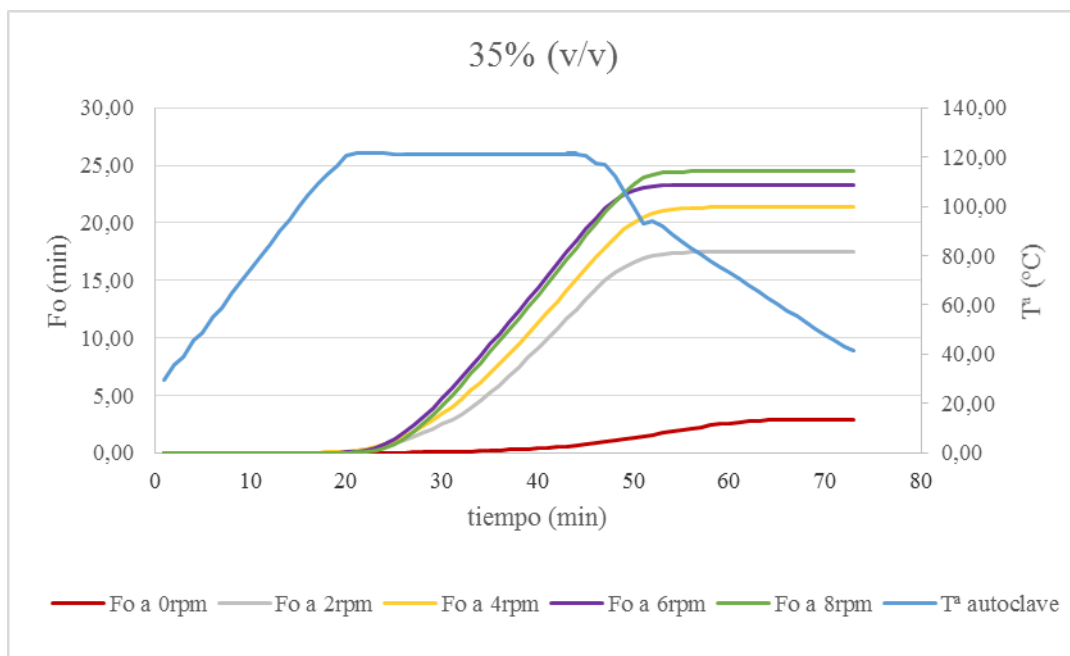


Gráfico 10. Evolución del valor de F_0 para las diferentes velocidades de rotación en el producto sopa con espacio de cabeza de 35% (v/v).

A la vista de los resultados, la diferencia mayor se produce entre el tratamiento en estático y la primera velocidad de rotación (2rpm). Entre el resto de velocidades no existen cambios en el valor de F_0 tan claros. Es por esto que se decide realizar un análisis estadístico para comprobar si existen diferencias significativas o no entre los tres espacios de cabeza en las 5 velocidades empleadas.

Tabla 16. Análisis de la Varianza para F_0 . Influencia de las 5 velocidades de rotación (0, 2, 4, 6 y 8 rpm) y los tres espacios de cabeza de 15%, 25% y 35%.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Velocidad	291769,	4	72942,2	1,05	0,3962
B:Volumen espacio de cabeza	138663,	2	69331,7	1,00	0,3791
INTERACCIONES					
AB	555209,	8	69401,2	1,00	0,4543
RESIDUOS	2,07588E6	30	69195,9		
TOTAL (CORREGIDO)	3,06152E6	44			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

No existen diferencias significativas en los valores de F_0 para las diferentes velocidades y los tres espacios de cabeza. A diferencia de lo expuesto por Tucker et al. (2006), los cuales afirmaban que el movimiento de la burbuja presente en el espacio de cabeza favorecía la mezcla de los compuestos y al mismo tiempo la transferencia de calor, en este caso no se aprecia una diferencia significativa en la obtención del valor final de F_0 según el espacio de cabeza. La inexistencia de cambios significativos entre los diferentes espacios puede ser debido a la presencia de vapor de agua en este espacio con propiedades termo-física similares que tendrían aparentemente los mismos efectos de convección natural. (Mohamed, I.O. 2007).

4.5. Efecto del tratamiento térmico sobre el aspecto visual del producto

4.5.1. Efecto del tratamiento térmico inicial sobre la calidad visual

En este primer apartado se realiza una comparación de los atributos color, textura y consistencia entre los productos que no han sufrido ningún tratamiento térmico (valor 0 de cada parámetro en la escala) y los que han sido sometidos a un tratamiento térmico con un tiempo de calentamiento de 20 minutos y un tiempo de mantenimiento de 25 y a las velocidades que se indican en la tabla.

Color

Tabla 17. Comparación del atributo color en cada producto para las diferentes velocidades de rotación.

	0 rpm	2 rpm	4 rpm	6 rpm	8 rpm
Alubia	1	1	1	2	2
Guisante	5	5	5	5	5
Maíz	0	2	2	2	2
Alcachofa	-1	-1	0	-1	-1
Salsa carbonara	1	1	1	1	1
Sopa	1	3	2	2	3

*Valores negativos hasta -5 indican una pérdida de color hacia colores más claros

**Valores positivos hasta 5 indican un aumento de color hacia colores más oscuros.

***El 0 indica que no existen cambios entre los productos.

En general los productos sufren un cambio de color hacia colores más oscuros a excepción de la conserva de alcachofa que debido a que su líquido de gobierno es el aceite, la apreciación del color final es más clara que la inicial. La degradación de color es debida principalmente a las altas temperaturas a las que se somete el producto que afectan a los compuestos responsables del color, los pigmentos.

En las imágenes siguientes se aprecian mejor las diferencias señaladas en la tabla anterior.



Ilustración 10. Conserva de alubias antes (izq.) y después (drch.) del tratamiento térmico.

El cambio de color en la alubia se debe a una alteración por el calor del pigmento responsable del color blanco, hacia colores más oscuros. Además sumado al aumento de la viscosidad del líquido de gobierno debida a la gelatinización del almidón, el aspecto final del producto es ligeramente más amarillento que el inicial.



Ilustración 11. Conserva de guisantes antes (izq.) y después (drch.) del tratamiento térmico

El guisante es el producto en el que más se aprecia el cambio de color. Pasa de un verde intenso a un verde apagado debido principalmente a que la clorofila, pigmento responsable del color verde se degrada con el calor.



Ilustración 12. Conserva de maíz antes (izq.) y después (drch.) del tratamiento térmico

El maíz apenas presenta cambios destacables de color tras el tratamiento térmico. El líquido de gobierno se vuelve ligeramente más oscuro y denso debido a la gelatinización del almidón producida por las altas temperaturas. El pigmento responsable del color en este producto son las xantofilas.

Textura

Tabla 18. Comparación de la dureza del producto antes y después del tratamiento a las diferentes velocidades de rotación mediante percepción táctil.

	0 rpm	2 rpm	4 rpm	6 rpm	8 rpm
Alubia	3	3	3	3	4
Guisante	5	5	5	5	5
Maíz	4	4	3	3	3
Alcachofa	5	5	5	5	5

*Los valores positivos hasta 5 indican un mayor ablandamiento de los tejidos

Todos los productos analizados presentan una menor dureza que el producto sin tratar. Durante el procesado térmico de las verduras, se rompe la estructura de las células, produciéndose una pérdida de turgencia. Además esto también produce la desnaturalización y degradación de los componentes de la membrana celular y de otros polisacáridos que influyen en la textura final.



Ilustración 13. Conserva de alcachofa tras el tratamiento térmico a 8 rpm.

El producto que más cambios sufre cuando se le somete a un tratamiento con rotación es la alcachofa. La foto 13 muestra la conserva de alcachofa tras el tratamiento a la máxima velocidad. Los corazones de alcachofa salen deshechos y sin su forma original mezclados con el aceite del líquido de gobierno.

Homogeneidad

Tabla 19. Comparación del atributo homogeneidad entre las diferentes velocidades de tratamiento y el producto sin procesar.

	0 rpm	2 rpm	4 rpm	6 rpm	8 rpm
Salsa carbonara	0	0	-1	-1	1
Sopa	-3	1	2	3	5

*Valores negativos hasta -5 indican mayor homogeneidad.

**Valores positivos hasta 5 indican menor homogeneidad.

***El 0 indica que no existen cambios entre los productos.



Ilustración 14. Salsa carbonara tras el tratamiento en estático.



Ilustración 15. Salsa carbonara tras el tratamiento térmico de 8rpm.

Cuando la salsa carbonara es sometida a un tratamiento térmico con rotación las partes sólidas del producto se concentran en zonas opuestas respecto al eje del producto. En cambio, cuando el producto es tratado en estático ésta separación de los componentes no aparece. Tampoco aparece en este caso separación de fases, problema que suele aparecer debido a los diferentes compuestos del producto.

En el caso de la sopa, cuando es tratada en estático los fideos quedan apelmazados en el fondo del bote formando una estructura compacta. Por el contrario, si se les aplica una velocidad de rotación mínima, estos quedan sueltos suspendidos en el líquido. A velocidades mayores el fideo queda completamente deshecho formándose una pasta homogénea.



Ilustración 16. Aspecto de la sopa antes del tratamiento (arriba izq.), tras el tratamiento en estático (arriba drch.), tras el tratamiento a 2 rpm (abajo izq.) y tras el tratamiento a 8 rpm (abajo drch.).

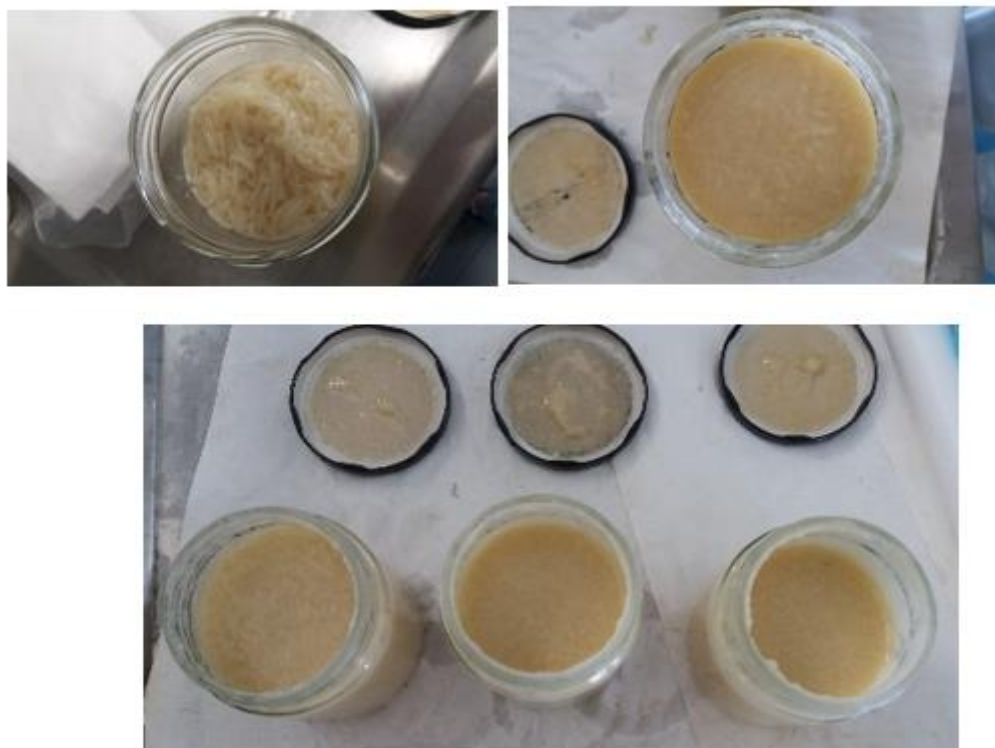


Ilustración 17. Consistencia del fideo tras el tratamiento en estático (arriba izq.), tras el tratamiento a 2 rpm (arriba a la drch.) y tras el tratamiento a 8 rpm (abajo).

4.5.2. Efecto de los tratamientos seleccionados para cada producto sobre su calidad.

En esta segunda parte el análisis se realiza entre el producto sometido al tratamiento inicial (tomándose los datos de la tabla 17 a la velocidad indicada en la tabla 20) y el sometido al tratamiento con los tiempos del Método de Ball (debido a que los tiempos de mantenimiento son más prolongados que en el caso del Método General). Los tiempos y velocidad de procesado de cada producto se presentan a continuación:

Tabla 20. Tiempos de calentamiento y mantenimiento de los productos analizados.

	Inicial		Método de Ball		velocidad (rpm)
	tiempo de calentamiento (min)	tiempo de mantenimiento (min)	tiempo de calentamiento (min)	tiempo de mantenimiento (min)	
Alubia	20	25	12,9	17,7	0
Guisante	20	25	14,7	20,3	2
Maíz	20	25	14,6	20,1	2
Alcachofa	20	25	19,8	27,3	2
Salsa carbonara	20	25	22,1	36,5	8
Sopa	20	25	15,7	21,7	4

Tabla 21. Comparación de atributos entre el producto tras el tratamiento inicial y tras el tratamiento con Ball.

Producto	Color		Textura		Consistencia	
	Inicial	Ball	Inicial	Ball	Inicial	Ball
Alubia	1	1	3	2	-	-
Guisante	5	5	5	5	-	-
Maíz	2	2	4	3	-	-
Alcachofa	0	-1	5	5	-	-
Salsa carbonara	1	3	-	-	1	2
Sopa	3	3	-	-	1	1

*Valores negativos hasta -5 indican una pérdida de color hacia colores más claros

**Valores positivos hasta 5 indican un aumento de color hacia colores más oscuros.

***El 0 indica que no existen cambios entre los productos.

Para el parámetro color apenas se constatan cambios. Todos los valores son iguales al producto inicial excepto en el caso de la alcachofa y la salsa carbonara. En estos dos procesos, el tiempo de mantenimiento es superior al del tratamiento del producto inicial. Como se ha comentado en el apartado anterior, la alcachofa al estar recubierta de aceite como líquido de gobierno el color final que presenta es ligeramente más claro que el inicial, y en este caso como el tiempo de mantenimiento es superior este cambio es más acusado, de ahí que presente un valor de -2 en la escala. En el caso de la salsa carbonara, el color de la salsa tras el tratamiento con los tiempos de Ball, es ligeramente más oscuro que el inicial. Esto puede ser debido a alteraciones producidas por las altas temperaturas y debido a su exposición prolongada son más notorias que en el caso anterior.

La textura también se ve influenciada por el tiempo de mantenimiento que recibe el producto. En el caso de la alubia y el maíz, dado que se reducen estos tiempos, algunos granos no salen tan blandos como en el caso anterior, siendo necesario un mayor tiempo de mantenimiento para asegurar la calidad del producto. En cambio, en la alcachofa como se aumenta el tiempo de mantenimiento, el producto es sometido a un tiempo mayor a altas temperaturas, dando como resultado un producto excesivamente blando que se deshace al tocarlo. Para este producto serían necesarios temperaturas de procesado más bajas para que no se produzca el ablandamiento excesivo de los tejidos.

Por último, la consistencia de la salsa carbonara es mayor en el producto optimizado que en el inicial. Anteriormente el producto presentaba una separación de la parte sólida (el beicon) en posiciones opuestas al eje perpendicular del bote. En este caso, esta parte sólida queda bien mezclada con el producto.

Los productos sometidos a tiempos de mantenimiento más prolongados traen consigo cambios más notorios en los atributos estudiados. Para estudios posteriores se podría considerar el análisis de estos atributos mediante métodos instrumentales los cuales proporcionan datos más cuantificables y exactos de la calidad final del producto.

5. Conclusiones

De los resultados obtenidos se puede concluir que:

En cuanto al efecto del producto:

1. Las propiedades físico-químicas del producto influyen en la forma de transferencia de calor.
2. Productos con partículas de tamaño pequeñas cuyo calentamiento se produce por convección aplicando el mismo tratamiento de esterilización de referencia obtienen valores de F_0 superiores que aquellos que contienen partículas de mayor tamaño, para el mismo tiempo de tratamiento.
3. En los productos cuyo calentamiento se produce por conducción se necesitan tiempos de tratamiento más prolongados para obtener el mismo valor de F_0 que aquellos en los que se lleva a cabo por convección.

En cuanto al efecto de la rotación:

1. La rotación favorece la transferencia de calor desde el medio calefactor al interior del producto, siendo esta más notoria en aquellos productos cuyo calentamiento se produce por convección que aquellos que presentan un calentamiento por conducción. La rotación induce el movimiento del fluido y de las partículas suspendidas, resultando en una creación de corrientes de convección que aceleran la penetración de calor. Existe una velocidad de rotación óptima para cada producto a partir de la cual no se presentan diferencias significativas.
2. La rotación se hace significativa a velocidades de 2 rpm, en la sopa, el guisante y el maíz. En cambio la salsa carbonara y las alcachofas necesitan velocidades de rotación mayores, de 4 rpm y 8 rpm respectivamente. La alubia presenta diferencias significativas a 8 rpm. Debido a que la rotación favorece la penetración de calor, el tiempo necesario para obtener el valor de F_0 requerido es menor, consiguiéndose un menor gasto energético así como una disminución en la intensidad de las reacciones indeseables que se producen durante el tratamiento térmico y que atañen a la calidad final del producto.
3. El espacio de cabeza no influye en la transferencia de calor ni en el proceso realizado en estático ni cuando se aplica una velocidad de rotación. Esto es debido a la presencia de vapor existente en el espacio el cual tiene propiedades termo-físicas similares que podrían tener los mismos efectos de convección natural.

En cuanto a la mejora/optimización de procesos

El Método General y el Método de Ball empleados para la optimización del tratamiento consiguen reducir los tiempos de tratamiento, obteniéndose productos que cumplen con los requisitos de seguridad alimentaria. El Método de Ball predice tiempos más prolongados que el General, pero con los cálculos realizados es posible la modificación de parámetros como la temperatura inicial, la temperatura de mantenimiento, que con el Método General no es posible.

En cuanto a la calidad final del producto:

El tratamiento térmico produce una pérdida de la calidad del producto. Tiempos de tratamiento prolongados, sobre todo durante la fase de mantenimiento, provocan cambios sobre los atributos que caracterizan el producto. Además la rotación también influye en el aspecto final del mismo, siendo necesario una combinación de tiempo, temperatura y velocidad durante el tratamiento que garantice la calidad del producto.

En próximos estudios sería interesante analizar la calidad del producto mediante instrumentación para poder disponer de datos que junto con los obtenidos de los Métodos de optimización llevarían a un ajuste más preciso del tratamiento térmico. Conocer las variaciones en la forma de transmisión de calor para los diferentes productos permite su agrupación a la hora de aplicar el tratamiento térmico, facilitando las operaciones de tratamiento a las empresas del sector agroalimentario.

6. Referencias

- Abril, J. y Cas, A. (2010) “Estudio de la penetración de calor en alimentos procesados en sistemas de esterilización rotatorios”. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Pública de Navarra.
- Ali, A.A., Sudhir, B. y Gopal, T.K.S. (2006) “Effect of rotation on the heat penetration characteristics of thermally processed tuna in oil in retort pouches”. *Int. J. Food Sci. Technol.* 41, 215-219.
- Anantheswaran, R.C. y Rao, M.A. (1985a) “Heat transfer to model Newtonian liquid foods in cans during end-over-end rotation”. *Journal of Food Engineering*, 4 (1), 1–19
- Anantheswaran, R.C. y Rao, M.A (1985b) “Heat transfer to model non-Newtonian liquid foods in cans during end-over-end rotation”. *Journal of Food Engineering*, 4 (1), 21–35
- Ball, C.O. (1923) “Thermal process time for canned foods”. Bull. 37, Vol. 7, Part. 1. *National Research council*. Washington, D.C. USA.
- Ball, C.O. y Olson, F.C.W. (1957). *Sterilization in Food Technology. Theory Practice and Calculation*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Berry, M.R. y Bradshaw, J.G. (1982) “Heat penetration for sliced mushrooms in brine processed in still and agitating retorts with comparisons to spore count reduction”. *J. Food Sci.* 47, 1698-1704.
- Berry, M.R., Bradshaw, J.G. y Kohnhorst, A.L. (1985) “Heating characteristics of ravioli in brine and in tomato sauce processed in agitating retorts”. *J. Food Sci.* 50, 815-822.
- Berry, M.R. y Kohnhorst, A.L. (1985) “Heating characteristics of homogeneous milk-based formulas in cans processed in an agitating retort”. *J. Food Sci.* 50, 209-214 y 253.
- Berry, M.R. y Dickerson, R.W. (1981) “Heating characteristics of whole kernel corn processed in a Steritort”. *Journal of Food Science*, 46 (3), 889-895
- Bigelow, W.D., Bohart, G.S., Richardson, A.C y Ball, C.O. (1920) “Heat penetration in processing canned foods”. Bull. N° 16L, *Nattional Cannners Associattion* (NCA), Washington, D.C., U.S.A.
- Bigelow, W.D. y Esty J.R. (1920) The thermal death point in relation to time of typical thermophilic organisms. *J. Infectious Dis.*, 27 (6): 602-619
- Casp, A. y Abril, J. (1999). *Procesos de conservación de alimentos. Colección tecnología de alimentos*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid
- Clifcorn, L.E., Peterson, G.T., Boyd J.M., y O'Neil J.H (1950) “A new principle for agitating in processing of canned foods”. *Food Technology*, 4, 450–460.
- Deniston M.F., Hassan B.H., and Merson, R.L. (1987) “Heat transfer coefficients to liquids with food particles in axially rotating cans”. *Journal of Food Science*, 52 (4), 962–966.
- Dignan, D.M. y Gavin, A. (2007) *Alimentos enlatados: Principios de control del proceso térmico, acidificación y evaluación del cierre de los envases. Fundación de Ciencia y Educación de la GMA*. Wahington, D.C.
- Fernandez, C.L., Rao, M.A., Rajavsireddi, S.P., y Sastry, S.K., (1988) “Particulate heat transfer to canned beans in steritort”. *Journal of Food Process Engineering*, 10, 183–198.

Flambert, F. y Deltour, J. (1972) "Exact lethality calculation for sterilizing process. I. Principles of the method". *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*. 5, (2), 72-73.

Gillepsy, T.J. (1946) "The heat resistance of spores of thermophilic bacteria I." Annual Report 1946. Pp 540-49. Campden and Chaorleywood Food Research Ass. Chipping Campden.

Greg, J., y Walden, R., *Shaka Retorts Shake Up the Shelf-Stable Food Paradigm*. Consultada el 18 de mayo de 2016. En: <http://www.retorts.com/white-papers/shaka-retorts-shake-up-the-shelf-stable-food-paradigm/>

Hayakawa, K.(1970). "Experimental formulas for accurate estimation of transient temperature of food and their application to thermal process evaluation". *Food Technology*. 24 (12), 1407-1418.

Heldman, D. y Hartel, R. (1997). "Principles of food processing". Chapman y Hall. New York.

Herndon, D.H., Griffin Jr., R.C. y Ball, C.O. (1968). "Use of computer-derived tables to calculate sterilizing processes for packaged foods". *Food Technology*. 22 (4) 473-478, 480,482,484.

Holdsworth, D. y Simpson, R. (2007) "Thermal Processing of Packaged Foods". Chile y Reino Unido. Springer.

Jakobsen, F. (1954) "Notes on process evaluation" *Food Res*. 19, 66-79.

Knap, R.P. y Durance, T.D. (1998). "Thermal processing of suspended food particles in cans with end-over-end agitation". *Food Res. Int*. 31, 635-643.

Kreith, F., Manglik. R.M., y Bohn, MS. (2012) "Principios de transferencia de calor". Mexico. Cengage Learning.

Lenz, M. K. (1977). The lethality Fourier number method. Its use in estimating confidence intervals of the lethality or process time of a thermal process and in optimizing thermal processes for quality retention. Thesis, Dept. of Food Science. Univ. of Wisconsin

Lenz, M.K., y Lund, D.B., (1978) "The lethality-fourier number method heating rate variations and lethality confidence intervals for forced-convection heated foods in containers". *Journal of Food Process Engineering*, 2 (3), 227-271.

Lopez, A. (1987) A complete course in Canning-Book 1, Basic Information on Canning. 11 ed.,The Canning Trade, Baltimore. Courtesy CTI Publications.

Maroulis, Z.B. y Saravacos, G.D. (2003). *Food Process Design*. CRC press

Magoon, C.A. y Culpepper C.W. (1921). Study of the factors affecting temperature changes in the container during canning of fruits and vegetables. Washington, D.C. U.S. Dept. of Agriculture.

Meng, Y. y Ramaswamy, H.S. (2005) "Heat transfer coefficients associated with canned particulate/non-Newtonian fluid (CMC) system during end-over-end rotation". *Food and Bioprocess Processing*, 83 (C3), 229-237.

Meng, Y. y Ramaswamy, H.S. (2006) "Visualization of particle/liquid movements in high viscous fluids during end-over-end rotation". *J. Food Eng*. 80, 545-552.

- Miranda-Zamora, W.R., y Teixeira, A.A. (2012). Principios matemáticos del proceso térmico de alimentos. Ed: AMV Ediciones. Peru, Florida y Madrid.
- Mohamed, I.O. (2007). "Determination of an effective heat transfer coefficients for can headspace during thermal sterilization process". *Journal of Food Engineering* 79, 1166–117.
- Morales-Blancas, E. y Torres, J. (2003a) "Determination of thermal resistance parameters". En: *Encyclopedia of Agricultural and Food Engineering*. Heldman, D.R. ed. Marcel Dekker Inc. New York
- Morales-Blancas, E. y Torres, J. (2003b). "Thermal Resistance Constants". En: *Encyclopedia of Agricultural and Food Engineering*. Heldman, D.R. ed. Marcel Dekker Inc. New York
- Naveh, D. y Kopelman, I.J. (1980) "Effect of some processing parameters on the heat transfer coefficients in a rotating autoclave". *J. Food Process. Preserv.* 4, 67-77.
- Olson, F.C.W., y Jackson, J.M. (1942). "Heating curves: theory and practical applications". *Ind. Eng. Chem.* 34(3), 337– 341.
- Opinion of the Scientific Panel on Biological Hazards on the request from the Commission related to *Clostridium* spp in foodstuffs. *The EFSA Journal* (2004) 199, 1-65
- Pflug, I.J. (1987). "A textbook for introductory course in microbiology and engineering of sterilization" (sixth ed.). Minneapolis, Minnesota: Environmental Sterilization Laboratory
- Rao, M.A. y Anantheswaran R.C., (1988) "Convective heat transfer to fluid foods in cans". *Advances in Food Research*, 32, 39–84.
- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S., (1995) "Fluid to particle heat transfer coefficient in cans during end-over-end processing". *Lebensmittel-Wissenschaft und.Technologie*, 28 (1), 56–61.
- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S., (1996) "Particle heat transfer coefficient under various retort conditions with end-over-end rotation". *Journal of Food Process Engineering*, 19, 403–424.
- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S., (1998). "Multi-particle mixing behaviour and its role in heat transfer during end-over-end rotation agitation of cans". *Journal of Food Engineering*, 38, 141–152.
- Sablani, S.S. y Ramaswamy, H.S., (1999). "End-over-end agitation processing of cans containing liquid particle mixtures. Influence of continuous vs. oscillatory rotation". *Food Science and Technology International*, 5 (5), 385–389.
- Scott Williams, Vice President of Allpax Products. *Which Retort Is Best for Your Container?*. Consultada el 12 de mayo de 2016. En: <http://www.retorts.com/white-papers/which-retort-is-best-for-your-container/>
- Simpson, R., Almonacid, S., y Teixeira, A. (2003). "Bigelow's General Method revisited: development of a new calculation technique". *Journal of Food Science*, 68 (4), 1324-1333.
- Singh Rattan, N. y Ramaswamy, H.S. (2014). "Comparison of free/bi-axial, fixed axial, end-over-end and static thermal processing effects on process lethality and quality changes in canned potatoes". *Food Science and Technology*. 58, 150-157.
- Sobel, J., Tucker, N., Sulka, A., McLaughlin, J. y Maslaskana, S. (2004). "Foodborn botulism in the United States", 1990-2000. *Emerging Infectious Diseases* 10 (9). 1606-1611.

Spinak, S.H. y Wiley, R.C. (1982) "Comparisons of the general and Ball formula methods for retort pouch process calculations". *Journal of Food Science*. 47 (3), 880-884, 888.

Stoforos, N.G. y Merson, R.L. (1992). "Physical property and rotational speed effects on heat transfer in axially rotating liquid/particulate canned foods". *Journal of Food Science*. 57 (3), 749-754.

Stumbo, C.R. (1973) "Thermobacteriology in Food Processing" (2ª edición). Academic Press, New York.

Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. y col. (1969a) "Computer determination of spore survival distributions in thermally-processed conduction-heated foods". *Food Technology* (Champaign). 23 (3), 352-54.

Teixeira, A. A., Dixon, J. R., Zahradnik, J. W. y col. (1969b) "Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods". *Food Technology* (Champaign). 23 (6), 845-50.

Thermal Processing of Food. Safefood 360, Inc. 2014

Tripathi, R. N. y Nirankar Nath (2003). "Determination of thermal process requirements for baked soybeans canned in brine and tomato sauce - a comparative study of the methods of process calculation". *Journal of Food Science and Technology*. 40 (1), 11-16.

Tucker, G.S. (2004) "Improving rotary thermal processing". En: *Improving the thermal processing of foods*. Richardson, P. edit. Woodhead Publishing, Cambridge

Tucker, G. S., Emond, S. P., Hughes, J. P. y col.(2006) "Maximizing the headspace bubble action in rotary thermal processing of packaged foods". *Food Manufacturing Efficiency*. 1 (1), 25-33.

Varma, M.N., y Kannan, A. (2006). "CFD studies on natural convective heating of canned food in conical and cylindrical containers". *Journal of Food Engineering*. 77, 1024-1036

7. Anexos

7.1. Primer bloque de ensayos

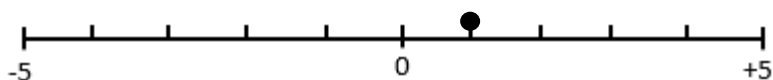
En esta primera parte se compara el producto que no ha sufrido tratamiento con el producto tratado con los tiempos iniciales.

7.1.1. Ficha técnica análisis visual en estático

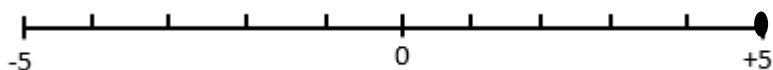
Color

En la escala presentada a continuación marca entre -5 y 0 si percibes cambios de color a más claros y entre 0 y +5 si es a colores más oscuros. Si no se perciben cambios marca el 0.

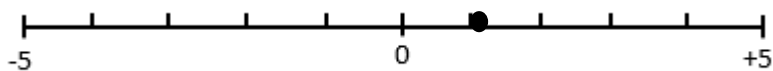
Alubia



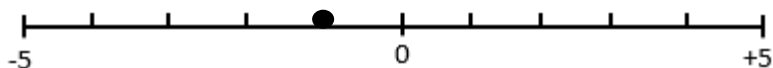
Guisante



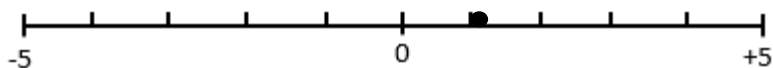
Maíz



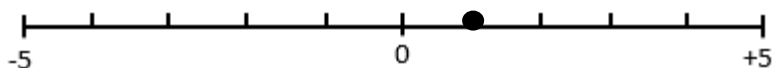
Alcachofa



Salsa carbonara



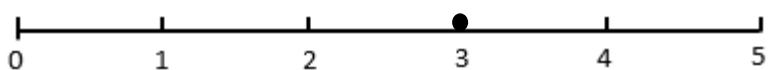
Sopa



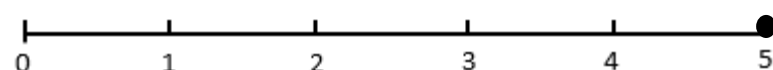
Textura

En este caso, el 0 indica que no existen cambios y conforme se avanza en la escala disminuye la dureza. Marca con una X el valor que creas conveniente.

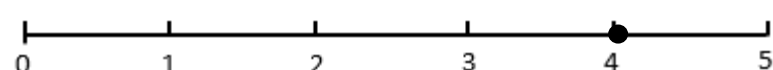
Alubia



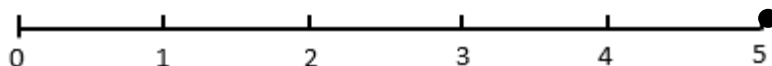
Guisante



Maíz



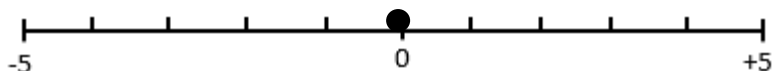
Alcachofa



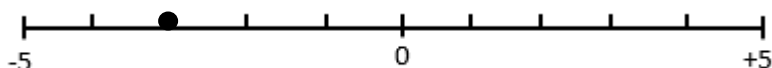
Homogeneidad

Por último en esta escala se representa la homogeneidad del producto. El 0 indica que no existen cambios, los valores negativos indican que disminuye la homogeneidad, por lo que el producto es más heterogéneo y los valores positivos indican un aumento de la homogeneidad.

Salsa carbonara



Sopa

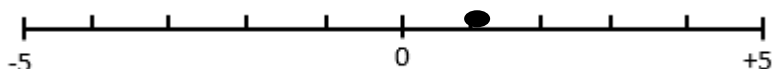


7.1.2. Ficha técnica análisis visual 2 rpm

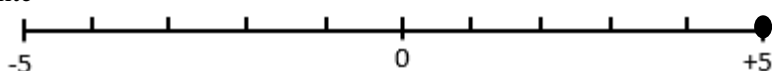
Color

En la escala presentada a continuación marca con una X entre -5 y 0 si percibes cambios de color a más claros y entre 0 y +5 si es a colores más oscuros. Si no se perciben cambios marca el 0.

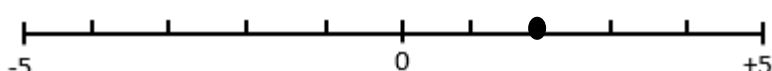
Alubia



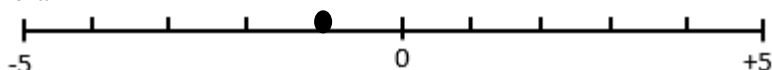
Guisante



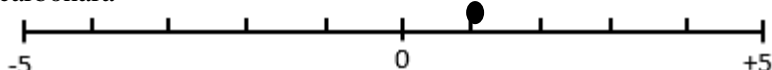
Maíz



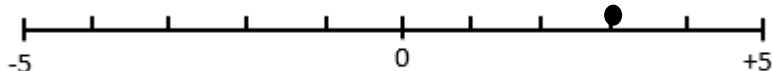
Alcachofa



Salsa carbonara



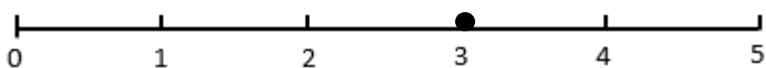
Sopa



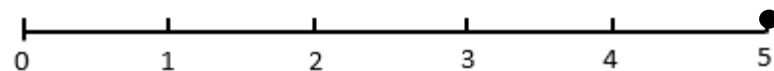
Textura

En este caso, el 0 indica que no existen cambios y conforme se avanza en la escala disminuye la dureza. Marca con una X el valor que creas conveniente.

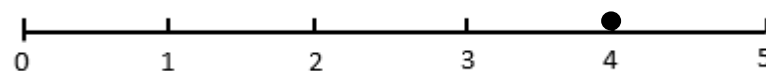
Alubia



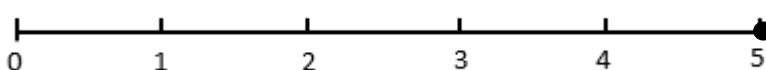
Guisante



Maíz



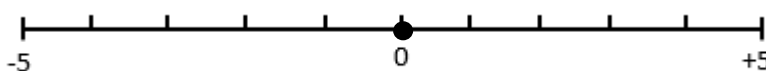
Alcachofa



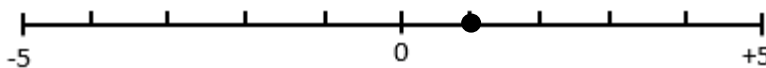
Homogeneidad

Por último en esta escala se representa la homogeneidad del producto. El 0 indica que no existen cambios, los valores negativos indican que disminuye la homogeneidad, por lo que el producto es más heterogéneo y los valores positivos indican un aumento de la homogeneidad.

Salsa carbonara



Sopa

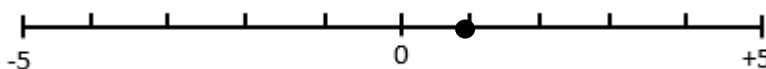


7.1.3. Ficha técnica análisis visual 4 rpm

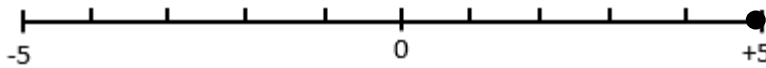
Color

En la escala presentada a continuación marca con una X entre -5 y 0 si percibes cambios de color a más claros y entre 0 y +5 si es a colores más oscuros. Si no se perciben cambios marca el 0.

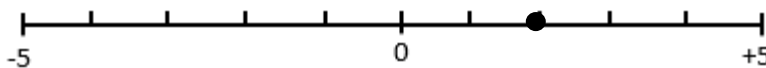
Alubia



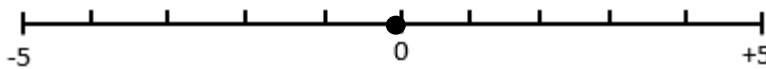
Guisante



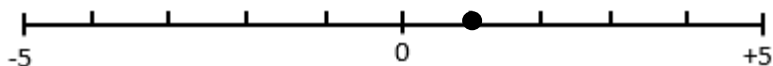
Maíz



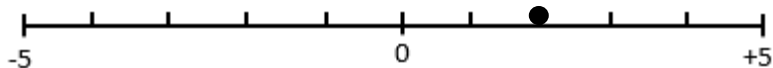
Alcachofa



Salsa carbonara

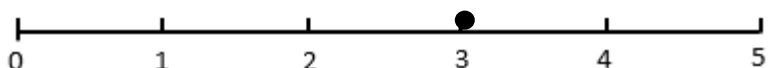


Sopa

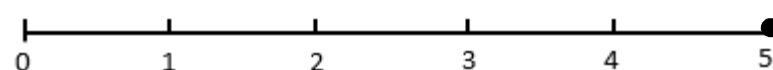
**Textura**

En este caso, el 0 indica que no existen cambios y conforme se avanza en la escala disminuye la dureza. Marca con una X el valor que creas conveniente.

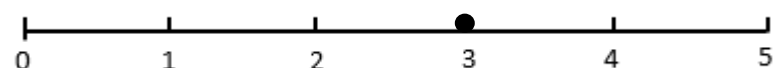
Alubia



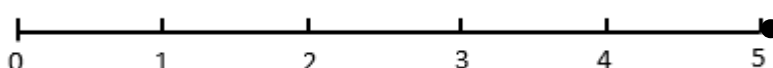
Guisante



Maíz

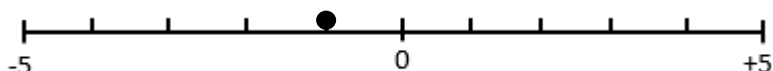


Alcachofa

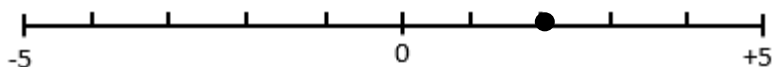
**Homogeneidad**

Por último en esta escala se representa la homogeneidad del producto. El 0 indica que no existen cambios, los valores negativos indican que disminuye la homogeneidad, por lo que el producto es más heterogéneo y los valores positivos indican un aumento de la homogeneidad.

Salsa carbonara

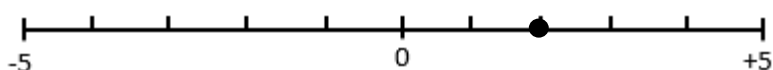


Sopa

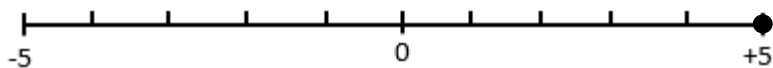
**7.1.4. Ficha técnica análisis visual 6 rpm****Color**

En la escala presentada a continuación marca con una X entre -5 y 0 si percibes cambios de color a más claros y entre 0 y si es a colores más oscuros. Si no se perciben cambios marca el 0.

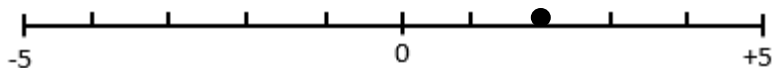
Alubia



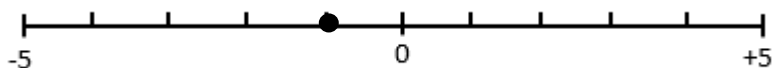
Guisante



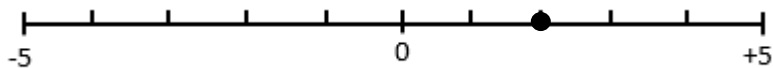
Maíz



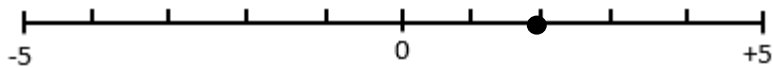
Alcachofa



Salsa carbonara

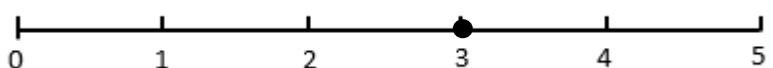


Sopa

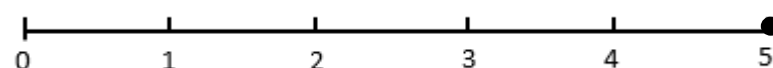
**Textura**

En este caso, el 0 indica que no existen cambios y conforme se avanza en la escala disminuye la dureza. Marca con una X el valor que creas conveniente.

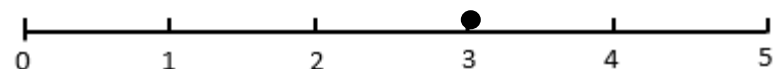
Alubia



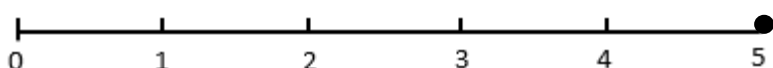
Guisante



Maíz

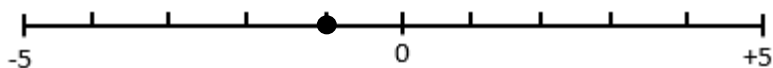


Alcachofa

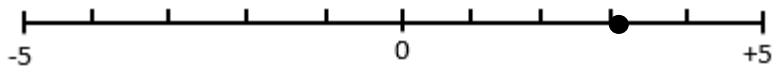
**Homogeneidad**

Por último en esta escala se representa la homogeneidad del producto. El 0 indica que no existen cambios, los valores negativos indican que disminuye la homogeneidad, por lo que el producto es más heterogéneo y los valores positivos indican un aumento de la homogeneidad.

Salsa carbonara



Sopa

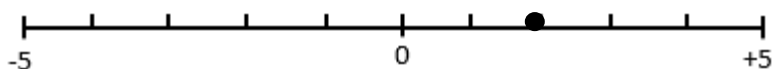


7.1.5. Ficha técnica análisis visual 8 rpm

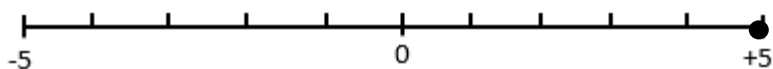
Color

En la escala presentada a continuación marca con una X entre -5 y 0 si percibes cambios de color a más claros y entre 0 y +5 si es a colores más oscuros. Si no se perciben cambios marca el 0.

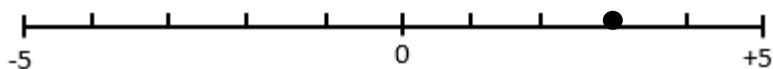
Alubia



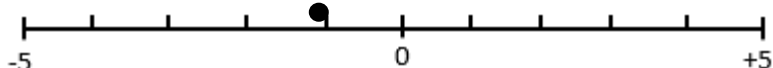
Guisante



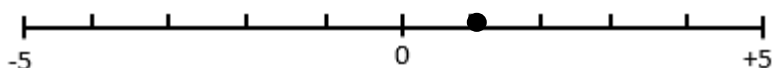
Maíz



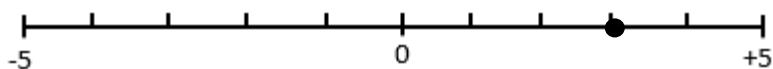
Alcachofa



Salsa carbonara



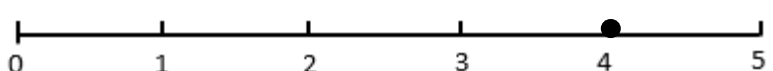
Sopa



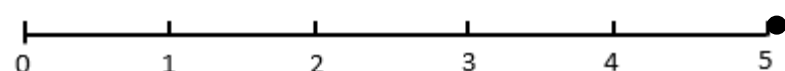
Textura

En este caso, el 0 indica que no existen cambios y conforme se avanza en la escala disminuye la dureza. Marca con una X el valor que creas conveniente.

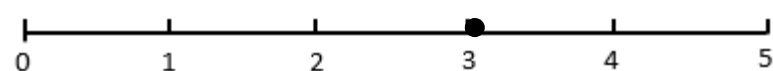
Alubia



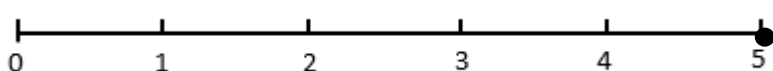
Guisante



Maíz



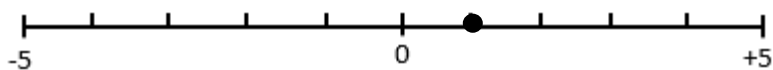
Alcachofa



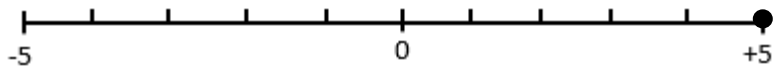
Homogeneidad

Por último en esta escala se representa la homogeneidad del producto. El 0 indica que no existen cambios, los valores negativos indican que disminuye la homogeneidad, por lo que el producto es más heterogéneo y los valores positivos indican un aumento de la homogeneidad.

Salsa carbonara



Sopa



7.2. Segundo bloque de ensayos

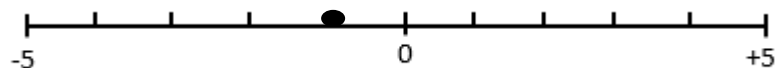
En esta parte del análisis visual se compara el producto tras el tratamiento inicial y el que ha sufrido el tratamiento con los tiempos de Ball, tomando como referencia el inicial. El 0 indica que no existen cambios; los valores negativos indican una pérdida de color hacia colores más claros, una mayor dureza y una menor homogeneidad y los valores positivos, colores más oscuros, productos más blandos y un aumento de la homogeneidad.

7.2.1. Análisis visual alubia en estático

Color

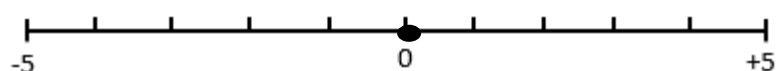


Textura

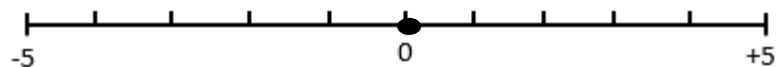


7.2.2. Análisis visual guisante con velocidad a 2 rpm

Color

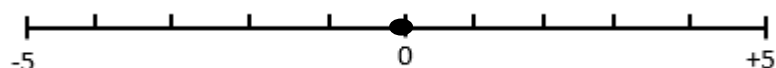


Textura

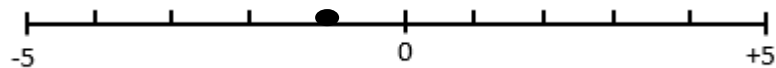


7.2.3. Análisis visual maíz con velocidad a 2 rpm

Color

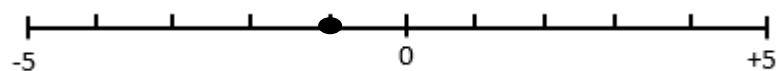


Textura

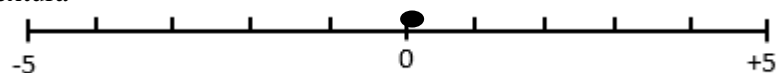


7.2.4. Análisis visual alcachofa con velocidad a 4 rpm

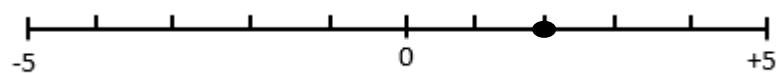
Color



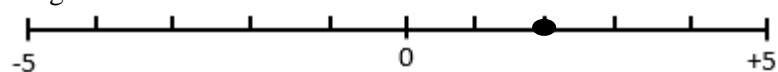
Textura

**7.2.5. Análisis visual salsa carbonara con velocidad de 8 rpm**

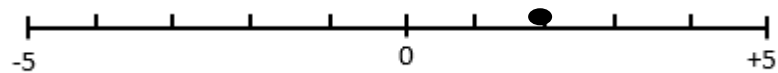
Color



Homogeneidad

**7.2.6. Análisis visual de la sopa a velocidad de 2 rpm**

Color



Homogeneidad

